Guide sur l'efficacité énergétique dans les alumineries

Un projet conjoint de :

l'Association de l'Aluminium du Canada
de
Ressources Naturelles Canada
de
l'Office de l'efficacité énergétique
et du
Programme d'économie d'énergie dans l'industrie canadienne (PEEIC)

Natural Resources Canada
Office of Energy Efficiency
Ressources naturelles Canada
Office de l'efficacité énergétique

Association de l'Aluminium du Canada
Aluminium Association of Canada

ASSOCIATION DE L'**ALUMINIUM** DU CANADA
ALUMINIUM ASSOCIATION OF CANADA
1010, Sherbrooke ouest, Bureau 1600, Montréal (Québec) Canada H3A 2R7
Téléphone : (514) 288-4842 Fax : (514) 288-0944 e-mail : associa@aluminium.qc.ca

L'Association de l'Aluminium du Canada représente les cinq producteurs canadiens d'aluminium de première fusion qui exploitent onze alumineries. Active depuis plusieurs années dans le Programme d'Économie d'Énergie dans l'Industrie Canadienne (PEEIC – CIPEC), l'Association a mis sur pied un groupe de travail sur l'efficacité énergétique.

Des plans d'action ont été soumis annuellement et des mesures concrètes ont été introduites dans chacune des usines, avec d'excellents résultats.

Ressources Naturelles Canada, par l'entremise de l'Office de l'efficacité énergétique, a proposé la réalisation d'un guide spécialement conçu pour l'industrie de l'aluminium. Grâce à la contribution financière du Gouvernement du Canada, un mandat a été confié à la firme Soprin-ADS et le présent Guide est le résultat de ce mandat.

Tous droits réservés. Toute forme de reproduction, mise en mémoire dans un système documentaire ou transmission en totalité ou en partie de cette publication par quelque procédé que ce soit, notamment sous forme électronique, mécanique ou par photocopie ou enregistrement, est interdite sans, au préalable, l'autorisation écrite de l'Association de l'Aluminium du Canada.

L'utilisation de dénominations sociales et/ou commerciales ne vise pas à promouvoir un quelconque produit ou système commercial.

Avril 1998

ALCAN ALOUETTE A.B.I. Alumerie LAURALCO Inc. Une filiale d'Alumax SOCIETE CANADIENNE DE METAUX REYNOLDS LTEE

GUIDE SUR L'EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE DANS LES ALUMINERIES

Sous la direction de:

- Pierre Langlois, ing.
Vice-président Développement
Efficacité énergétique et énergies renouvelables
Soprin ADS

- Christian L. Van Houtte
Président
Association de l'Aluminium du Canada

Auteurs:

Pierre Baillargeon, ing.
Directeur Énergie
Soprin ADS

Dominique Leclerc, ing.
Chargée de projet Industrie et énergie
Soprin ADS

Hakim Zahar, ing.
Directeur Industrie et énergie
Soprin ADS

Avec la collaboration de:

- Yvan Robitaille, ing.
Chargé de projet Industrie et énergie
Soprin ADS

- Christian L. Van Houtte
Président
Association de l'Aluminium du Canada

TABLE DES MATIÈRES

AVANT-PROPOS

INTRODUCTION

1.0 MESURES D'EFFICACITÉ ENERGÉTIQUE TRADITIONNELLES 1
- 1.1 Conversion d'un type d'énergie à un autre 1
- 1.2 Contrôle de la demande électrique 3
- 1.3 Remplacement d'un moteur existant par un moteur à haut rendement 4
- 1.4 Installation d'un entraînement à vitesse variable (EVV) sur un moteur 6
- 1.5 Optimisation du fonctionnement des systèmes d'air comprimé 8
- 1.6 Optimisation du fonctionnement des systèmes de ventilation 9
- 1.7 Pose de calorifuge 10

2.0 MESURES D'EFFICACITE ENERGETIQUES DANS L'INDUSTRIE DE L'ALUMINIUM 11
- 2.1 Optimisation de la position des brûleurs pour favoriser le transfert de chaleur dans les fours reverbères 11
- 2.2 Amélioration de l'étanchéité des fours 21
- 2.3 Installation de récupérateur de chaleur sur les cheminées des fours de fusion d'aluminium 25
  - 2.3.1 La source de chaleur 25
  - 2.3.2 Le lieu de rejet de chaleur 27
  - 2.3.3 Les implications techniques de la récupération de chaleur 28
  - 2.3.4 Les utilisations potentielles de la chaleur récupérée 31
- 2.4 Systèmes de récupération de chaleur 38
  - 2.4.1 Les récupérateurs de chaleur 38
  - 2.4.2 Les regénérateurs de chaleur 46

3.0 AUTRES MESURES APPLICABLES AUX ALUMINERIES 51
- 3.1 Fusion à l'oxy/fuel de l'aluminium secondaire 51
- 3.2 Installation de pompe à aluminium dans les fours de fusion 52
- 3.3 Installation de contrôle en temps réel pour le refroidissement des lingots d'aluminium 53

4.0 CONCLUSION 54

BIBLIOGRAPHIE

TABLEAU

Tableau 1 Pourcentage d'économie de combustible par le préchauffage de l'air de combustion 37

TABLE DES MATIÈRES (suite)

FIGURES

Figure 1	Rendements types des moteurs standards et à haut rendement	5
Figure 2	Puissance d'un système typique de ventilateur en fonction du débit, selon différentes sortes de mécanisme de contrôle	7
Figure 3	Transfert de chaleur dans un four réverbère	16
Figure 4	Localisation et orientation de brûleurs de four avec brûleurs à rayonnement1	17
Figure 5	Localisation et orientation de brûleurs de four réverbère avec brûleurs à convection	18
Figure 6	Débit d'air entrant d'une ouverture de ½ pouce autour d'une porte de four	24
Figure 7	Bilan typique de chaleur (à l'état stable)	26
Figure 8	Four à tubes radiants muni de récupérateurs et d'un préchauffeur	32
Figure 9	Exemple de récupération de chaleur avec deux fours	33
Figure 10	Récupérateurs à rayonnement	40
Figure 11	Récupérateurs à convection	42
Figure 12	Récupérateurs à plaques	43
Figure 13	Four à creuset muni d'un brûleur auto-récupérateur	44
Figure 14	Brûleur au gaz naturel à immersion	45
Figure 15	Régénérateur de chaleur	47
Figure 16	Brûleur avec auto-récupération	48
Figure 17	Recirculation des gaz de combustion	49

AVANT-PROPOS

Le présent guide sur l'efficacité énergétique dans les alumineries est une initiative de l'Association de l'Aluminium Canada. Il a été rédigé par Soprin ADS, une entreprise privée, spécialisée depuis plus de vingt ans en efficacité énergétique ainsi qu'en gestion de l'énergie et a été rendu possible, grâce à la collaboration financière du ministère des Ressources naturelles du Canada.

Ce guide, élaboré sous la supervision de l'Association de l'Aluminium du Canada, porte plus précisément sur certaines améliorations potentielles visant la réduction de la consommation énergétique dans les alumineries. Nous espérons que l'information contenue dans ce document permettra de sensibiliser et d'informer le personnel d'opération et d'ingénierie à l'utilisation rationnelle de l'énergie et aux possibilités d'application de concept d'efficacité énergétique dans l'accomplissement de leur tâche.

Les membres de l'équipe de rédaction tiennent à remercier toutes les personnes qui ont contribué à la réalisation de cet ouvrage et plus particulièrement monsieur Christian L. Van Houtte, président de l'Association de l'Aluminium du Canada ainsi que le groupe de travail sur l'énergie. Nous désirons remercier également messieurs Marc Montembeault et Gilles Dufour de l'Aluminerie Lauralco qui ont accepté de nous faire visiter leurs installations et répondre à toutes nos questions.

Pierre Baillargeon, ing.
Directeur Énergie
Soprin ADS
Longueuil, mars 1998

Dominique Leclerc, ing.
Chargée de projet Industrie et énergie
Soprin ADS
Québec, mars 1998

Hakim Zahar, ing.
Directeur, Industrie et énergie
Soprin ADS
Québec, mars 1998

INTRODUCTION

L'industrie de l'aluminium cherche sans cesse à réduire ses coûts comme à améliorer la qualité de ses produits. A cet égard, en ce qui concerne les procédés mettant en œuvre des appareils de chauffage dans cette industrie, c'est souvent en minimisant la consommation énergétique que l'on obtient un meilleur rendement de la production. Cette recherche d'économie d'énergie doit cependant s'effectuer de manière ordonnée, les priorités d'action devant être bien établies et respectées pour s'assurer que les moyens utilisés aboutissent à des résultats concrets, optimaux et rentables. Lors de l'établissement de ces priorités d'action, l'analyse de l'interaction entre les mesures d'efficacité énergétique retenues dictera bien souvent leur chronologie d'implantation future et leur rentabilité relative.

L'établissement de ces priorités est évidemment fonction de plusieurs facteurs comme la production, l'âge et l'état des équipements impliqués. La faisabilité des mesures d'efficacité énergétique envisagées ainsi que leur rentabilité ne peuvent être évaluées qu'après une analyse individualisée pour chaque usine, principalement en fonction de ses coûts d'énergie.

L'établissement des priorités des mesures d'efficacité énergétique à implanter dans une usine est souvent réalisé par un comité Énergie, regroupant les membres du personnel provenant de différents secteurs de l'usine, ou par la direction de l'usine. Les personnes ainsi impliquées déterminent les actions à entreprendre pour l'implantation des mesures retenues dans l'usine, et se donnent les moyens pour effectuer un bon suivi des résultats obtenus par rapport à la consommation énergétique de l'usine.

De façon générale, ces personnes commencent par fixer un objectif de consommation énergétique pour l'usine ou pour l'un de ces départements, en relation principalement avec les prévisions de production et les budgets de fonctionnement et d'entretien de l'usine. Cet objectif est établi en

fonction d'une période de facturation d'énergie, souvent nommée historique de facturation ou année de référence, ainsi que de la production de l'usine durant cette période.

Cet historique de facturation inclut tous les types d'énergie consommée par l'usine comme l'électricité, le gaz naturel ou le mazout. Il doit être pondéré afin de tenir compte des changements survenus au cours de cette période et pouvant avoir affecté de façon marquée la consommation énergétique de l'usine. Ces changements peuvent avoir été, par exemple, une panne majeure d'équipements ou un réaménagement dans le procédé de production de l'usine. L'historique de facturation peut être divisé par secteur ou par bâtiment, selon les compteurs et les sous-compteurs d'énergie disponibles. Dans le cas particulier où il n'existe pas de compteur d'énergie pour un secteur où les personnes en charge de l'énergie désirent concentrer leurs efforts, il peut alors être bénéfique d'installer un sous-compteur pour isoler ce secteur du reste de l'usine et ainsi pouvoir quantifier son énergie consommée. Ce sous-compteur peut également servir par la suite à assurer un bon suivi énergétique des mesures implantées dans ce secteur.

Cet objectif de consommation énergétique mène normalement à l'établissement des priorités d'action avec une emphase prononcée en premier lieu, sur les mesures nécessitant peu d'investissement, ou dont la période de rentabilité simple est courte. Les mesures avec de plus grands investissements ou une rentabilité plus longue seront par la suite implantées dans l'usine, en tenant compte de l'interrelation, ou effet de cascade, entre les différentes mesures d'efficacité énergétique préalablement installées.

La période de rentabilité simple est calculée selon le rapport entre la somme des investissements requis pour réaliser cette mesure et la somme des économies monétaires annuelles réalisées par l'implantation d'une mesure d'efficacité énergétique. La période de rentabilité simple visée dans l'industrie est généralement inférieure à 2 ans. Il existe d'autres types de calcul de la période de rentabilité qui tiennent compte, par exemple, de la perte de production, des frais supplémentaires d'entretien annuel, de la dépréciation ou de la plus-value apportée à l'usine par l'installation d'un

nouvel équipement, du financement du projet, de la prévision des taux d'intérêt, de l'impact d'une mesure sur les impôts payés par la compagnie, de la vie utile des nouveaux équipements, etc.

D'autres critères que ceux strictement économiques peuvent également venir bonifier l'implantation de mesures d'efficacité énergétique dans une aluminerie. Ce sera le cas, par exemple, d'une usine où l'on désire augmenter la production au-delà de la capacité disponible des fours de fusion ou limiter l'ajout de nouveaux équipements dû aux contraintes d'espace. Ceci peut également être le cas d'une usine où l'on désire transférer une partie de la production d'aluminium sur un équipement existant où l'installation de récupérateurs de chaleur est nécessaire si l'on veut accroître la capacité de production et éliminer l'utilisation de fours désuets ou sous-utilisés. D'ailleurs, l'impact financier de la modification d'équipements existants pour obtenir un rendement énergétique plus efficace est souvent moins onéreux que l'installation de nouveaux équipements.

Finalement, des critères tels que la sauvegarde de l'environnement ou l'augmentation de la sécurité du personnel peuvent ajouter une plus value supplémentaire à l'implantation de mesures d'efficacité dans plusieurs cas.

La recherche d'actions ou de mesures d'économie d'énergie dans une usine exige donc une vision de l'ensemble des composantes du procédé de fabrication et des équipements utilisés. Des mesures d'économie simples comme la pose d'isolant sur les murs extérieurs et l'optimisation du fonctionnement des équipements électro-mécaniques des bâtiments comme l'éclairage ou le chauffage des pièces, sont également possibles. Lors de la mise en œuvre d'un programme d'efficacité énergétique dans une usine, les mesures peuvent avoir un effet d'entraînement sur le personnel, lorsqu'elles sont implantées de façon convenable et ne nuisent pas au confort des travailleurs.

Nous traitons dans ce guide de certaines mesures d'efficacité énergétique envisageables dans les alumineries ainsi que des concepts techniques permettant de les implanter. Il est difficile d'avancer

des montants d'économie monétaire ainsi que des investissements pour une mesure particulière, étant donné que la rentabilité de chaque mesure doit faire l'objet d'une étude individualisée et est directement liée au coût de l'énergie payée par l'usine. Nous croyons qu'il n'en demeure pas moins que les mesures d'efficacité énergétique présentées dans ce document peuvent, de façon générale, être avantageusement réalisées et offrir une période de rentabilité intéressante.

Nous débutons ce guide par une présentation des mesures d'efficacité énergétique traditionnellement implantées dans le secteur industriel. Par la suite, nous traiterons, plus particulièrement, des mesures applicables aux fours de fusion telles que l'optimisation de la position des brûleurs à l'intérieur de fours réverbères, l'amélioration de l'étanchéité des fours ainsi que l'installation de récupérateurs de chaleur sur les cheminées des fours de fusion d'aluminium.

Finalement, un bref survol de d'autres mesures d'efficacité énergétique pouvant être rencontrées dans l'industrie de l'aluminium sera présenté à la fin de ce guide.

1.0 MESURES D'EFFICACITE ENERGETIQUE TRADITIONNELLES

Plusieurs mesures traditionnelles d'efficacité énergétique que l'on rencontre régulièrement en milieu industriel, peuvent s'appliquer dans le cas des alumineries. Nous vous présentons ici les plus communes, soit la conversion d'un type d'énergie à un autre, le contrôle de la demande électrique, le remplacement d'un moteur à efficacité standard par un moteur à haut rendement, l'installation d'un entraînement à vitesse variable sur un moteur, l'optimisation du fonctionnement des systèmes d'air comprimé et de ventilation, ainsi que la pose de calorifuge.

Cette présentation des mesures traditionnelles n'est pas exhaustive mais vise à faire ressortir les concepts de base permettant de réduire une partie de la consommation énergétique de l'usine.

1.1 CONVERSION D'UN TYPE D'ENERGIE A UN AUTRE

La conversion d'un type d'énergie à un autre peut être envisagée, en comparant le rendement de chacun des types d'énergie disponibles ainsi que leur coût respectif pour une application donnée.

Les compagnies telles Hydro-Québec et Gaz Métropolitain peuvent offrir des subventions, des rabais tarifaires, ou défrayer une partie des coûts d'étude ou de travaux de conversion dans certains cas. Nous vous suggérons de les consulter et de vous tenir informés des programmes disponibles d'aide à la conversion.

Les notions de base de la tarification d'énergie de ses compagnies doivent être bien comprises. Par exemple, en électricité, la consommation et la puissance appelée, le facteur de puissance et les pénalités sont des notions qu'il faut bien connaître. Il

faut également bien saisir la notion de la période d'hiver de facturation qui couvre du 1 décembre au 31 mars et où la demande électrique mensuelle maximale durant cette période influencera la puissance souscrite d'un client et souvent l'application de la prime d'hiver.

Du côté du gaz naturel, c'est plutôt le prix unitaire du gaz et de son transport, le volume journalier de consommation, le volume souscrit, les primes et les rabais qui sont les facteurs importants. Les dernières années ont vu apparaître des courtiers de gaz naturel vous donnant la possibilité de négocier le coût de la molécule de gaz naturel.

Au niveau du mazout, une conversion de brûleur au gaz naturel en un brûleur de type mixte, soit gaz naturel/mazout, peut permettre de diminuer les pénalités d'un tarif interruptible de gaz naturel.

D'autres ressources comme des experts-conseils peuvent être nécessaires pour déterminer l'impact d'une mesure de conversion sur votre tarification ou sur les contrats de fourniture d'énergie signés avec ces compagnies ou un courtier.

Bien que la tarification de l'électricité au Québec soit habituellement plus onéreuse que celle du gaz naturel ou du mazout pour des procédés de chauffage de four, l'utilisation de l'électricité peut, dans certains cas, être avantageuse et permettre d'éliminer d'autres frais en considérant qu'elle est propre, très flexible et possède une très haute densité d'énergie disponible. Le chauffage électrique par résistance, possédant un rendement de près de 100%, peut avoir un ou des avantages techniques menant globalement à une utilisation plus rationnelle de l'énergie à un moindre coût, tout comme le chauffage électrique par induction quoique moins efficace.

Dans d'autres cas, malgré le rendement de l'ordre de 70% à 75% obtenu par un appareil utilisant le gaz naturel, le remplacement d'un équipement électrique par un nouveau fonctionnant au gaz naturel permet de diminuer l'appel de puissance en période de pointe de l'usine et présente une période de rentabilité intéressante.

1.2 CONTROLE DE LA DEMANDE ELECTRIQUE

Le contrôle de la demande électrique de pointe d'une usine peut s'avérer une mesure d'efficacité énergétique très rentable. Cette demande de pointe vaut pour environ 50% de la facture mensuelle dans plusieurs cas et il importe de tenter de la diminuer le plus efficacement possible.

Par exemple, une mesure très simple et dont le coût direct est souvent inexistant, est le report du fonctionnement de certains équipements en dehors de la période de pointe de la demande de puissance électrique de l'usine. Cette mesure ne demande souvent que l'analyse de la facturation électrique au tarif L d'Hydro-Québec pour déterminer la période de pointe de l'usine et l'identification des équipements majeurs qui influencent cette demande de puissance maximale. Dans d'autres cas, il faut prévoir l'installation temporaire d'un enregistreur à l'entrée électrique de l'usine pour suivre le profil de la puissance demandée durant une certaine période de temps et mesurer l'ampérage réel des équipements si l'on veut déterminer les équipements dont le fonctionnement pourrait être déplacé en dehors de la période de pointe.

Une autre mesure envisageable est le délestage ou le cyclage de charge en période de pointe de demande électrique. Ce délestage ou cyclage doit cependant ne pas interférer dans la production de l'usine et nécessite l'ajout d'équipements pour le contrôle des appareils.

1.3 REMPLACEMENT D'UN MOTEUR EXISTANT PAR UN MOTEUR A HAUT RENDEMENT

Un moteur à haut rendement est un moteur à induction triphasée dont le rendement est supérieur à la moyenne des moteurs standard. Ce type de moteur plus efficace doit son haut rendement à de meilleurs matériaux et une conception améliorée, ce qui a pour effet de diminuer ses pertes. En général, sa fabrication se distingue par les points suivants :

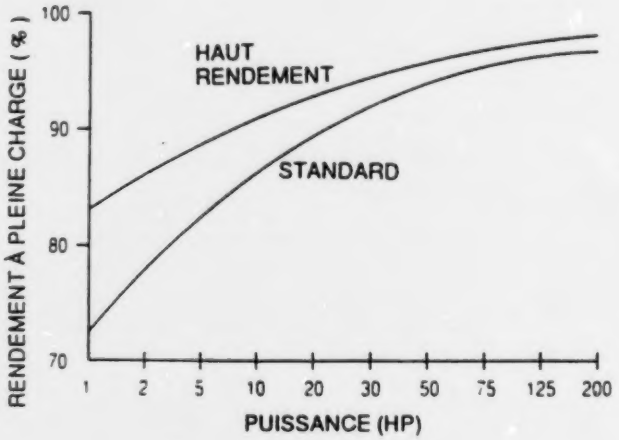
- des tôles de stator plus minces, en acier de meilleure qualité ;
- un pourcentage plus élevé de cuivre dans les enroulements ;
- un entrefer plus petit entre le rotor et le stator ;
- des paliers à frottement réduit ;
- des pertes par ventilation réduites ;
- des tolérances d'usinage plus justes.

Le remplacement d'un moteur existant par un moteur à haut rendement permet de réaliser des économies en réduisant sa quantité d'énergie électrique consommée (kWh) et sa puissance (kW). Il peut également contribuer à améliorer le facteur de puissance de l'usine dans certains cas. L'analyse de la rentabilité du remplacement d'un moteur existant par un moteur à haut rendement permet de vérifier la demande réelle nécessaire de cet équipement, qui s'avère souvent trop élevée. En effet, la plupart des industries utilisent des moteurs surdimensionnés pour se protéger contre les pannes de moteur, se donner la possibilité d'accroître la production et faire face aux fluctuations de la charge. Elles doivent alors payer le coût de cette sécurité par un faible rendement obtenu de ses moteurs.

La figure suivante indique qu'un moteur à haut rendement est généralement de 3% à 8% plus efficace qu'un moteur standard.

Figure 1

Rendements types des moteurs standards et à haut rendement



La portion de l'énergie motrice de la facture d'électricité d'une usine peut être relativement importante. Dans plusieurs cas, un moteur standard défectueux est remplacé de façon systématique par un moteur à haut rendement, étant donné son impact sur la pointe de demande électrique. En effet, il est souvent difficile de rentabiliser le remplacement d'un moteur standard en bon état par un moteur à haut rendement. Il est habituellement plus rentable d'attendre d'avoir à effectuer un rebobinage ou le remplacement d'un moteur standard pour installer un moteur à haut rendement. La rentabilité de cette mesure devient alors intéressante en considérant le coût marginal supplémentaire plutôt que le coût de ce type de moteur.

Par exemple, le remplacement d'un moteur standard par un moteur à haut rendement de 100 hp fonctionnant 4 000 heures par année au tarif L d'Hydro-Québec permettrait une économie annuelle de l'ordre de 500 $ avec un différentiel

de coût d'achat entre les deux moteurs de l'ordre de 700 $. L'investissement supplémentaire requis pour l'achat du moteur à haut rendement se paierait donc de lui-même en moins de deux ans.

1.4 INSTALLATION D'UN ENTRAINEMENT A VITESSE VARIABLE (EVV) SUR UN MOTEUR

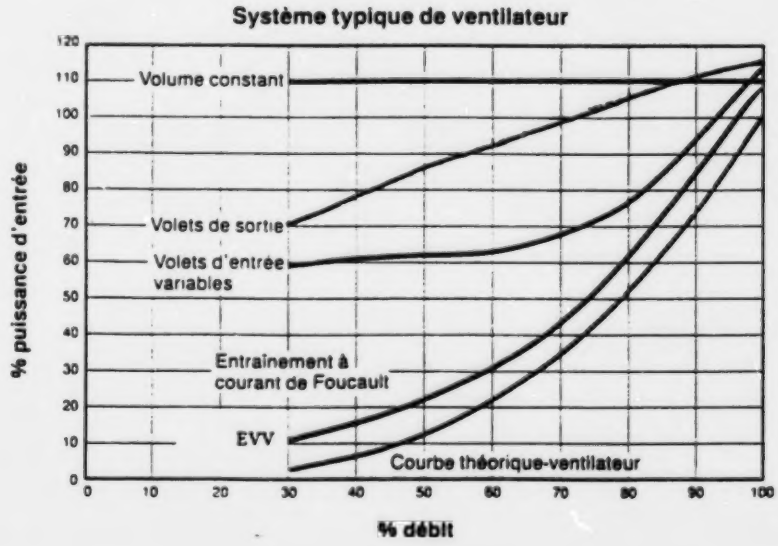
Un entraînement à vitesse variable (EVV) à courant alternatif (c.a.) est un système électronique de puissance qui contrôle la vitesse d'un moteur c.a. en faisant varier la fréquence ainsi que la tension appliquées à l'entrée de ce moteur. Il règle également la tension de sortie en fonction de la fréquence de sortie de façon à maintenir entre les deux un rapport relativement constant. C'est ce qui permet au moteur de développer un couple suffisant pour toute la gamme de vitesse. L' EVV permet donc au moteur d'un appareil centrifuge comme un ventilateur ou une pompe, d'ajuster son débit en fonction des exigences du procédé. Il remplace alors le registre d'un ventilateur ou l'étrangleur d'une pompe, qui laisse souvent le moteur fonctionner à plein régime en dépit des fluctuations de la demande de débit. Un EVV peut aussi être installé sur un moteur à courant continu (c.c.), cependant ce type d'entraînement utilise différentes technologies pour effectuer la variation de la vitesse de ce type de moteur.

Les entraînements à vitesse variable sont couramment utilisés dans la majorité des secteurs industriels du Québec. Un EVV permet d'ajuster la puissance d'un moteur à la demande réelle de la charge. Comme cette puissance varie au cube de la réduction de vitesse, une réduction de 20%, par exemple, par l'EVV mènera à une puissance réduite de l'ordre à 50%. L'économie est intéressante lorsqu'un EVV est installé dans une application ayant un pourcentage élevé d'étranglement ou de variation de la charge, un nombre élevé d'heures de fonctionnement par année et une forte demande de puissance. Dans le cas de l'industrie de l'aluminium, le

remplacement des registres de la cheminée d'un four de fusion par l'installation d'un EVV sur le moteur du ventilateur de cette cheminée, peut s'avérer une application intéressante.

Figure 2

Puissance d'un système typique de ventilateur en fonction du débit, selon différents mécanismes de contrôle



La figure 2 montre clairement la réduction de puissance à basse charge d'un système typique de ventilateur par rapport aux différentes sortes de mécanisme de contrôle de débit d'air.

1.5 OPTIMISATION DU FONCTIONNEMENT DES SYSTEMES D'AIR COMPRIME

Une révision du fonctionnement du système et du réseau d'air comprimé de l'usine peut également s'avérer nécessaire et générer des économies intéressantes. Sur un réseau d'air comprimé nouveau et bien conçu, des pertes d'air de l'ordre de 5% sont prévisibles. Les tests réalisés dans une grande quantité d'entreprises québécoises situent les pertes entre 20% et 40% avec une moyenne de 30% par rapport à la production d'air comprimé du réseau existant. Il existe donc un bon potentiel d'économie d'énergie. Les mesures d'efficacité énergétique les plus couramment implantées sur les systèmes d'air comprimé sont les suivantes :

- l'ajout d'un contrôle du point de rosée sur les assécheurs d'air au lieu d'un cycle de séchage établi à une période fixe ;
- la réduction des fuites d'air comprimé importantes sur les réseaux de distribution. Il n'est pas rare de constater qu'après le colmatage des fuites, il est possible de mettre un compresseur à l'arrêt ;
- l'ajout de purgeurs automatiques sans perte d'air comprimé à la sortie du refroidisseur et au réservoir d'air comprimé ;
- le remplacement de l'utilisation de l'air comprimé pour refroidir des surfaces chaudes par des souffleries à basse pression ;
- l'optimisation des méthodes de régulation ;
- une modification à la prise d'air neuf des compresseurs ;
- la gestion de la priorité de fonctionnement des compresseurs, selon leur rendement ;
- l'ajout de soufflettes à venturi sur les boyaux servant au nettoyage d'équipements.

1.6 OPTIMISATION DU FONCTIONNEMENT DES SYSTEMES DE VENTILATION

Les systèmes de ventilation des bâtiments d'une usine peuvent également faire l'objet d'une révision afin de déterminer si leur fonctionnement est optimal. On remarque que ces systèmes sont souvent mal entretenus et que le coût d'utilisation est sous-évalué. Ils auront parfois un impact sur la qualité de la production et le confort du personnel. Les mesures d'efficacité énergétique les plus couramment implantées pour les systèmes de ventilation sont les suivantes :

- le remplacement du contrôle des débits d'air à l'aide de registres par des entraînements à vitesse variable sur les moteurs des ventilateurs ;
- l'optimisation de la pression statique à l'intérieur des conduits de ventilation et la modification des connections à l'entrée et à la sortie des ventilateurs. On remarque souvent des systèmes de ventilation où des coudes serrés ou carrés installés dans les conduits à l'entrée ou à la sortie des ventilateurs. De telles configurations génèrent des vortex importants à l'entrée du ventilateur et modifient de façon significative son comportement et son efficacité par rapport aux données du manufacturier. On a déjà mesuré des baisses de rendement de l'ordre de 15% à 30% sur des installations de ventilateur avec de mauvaises configurations. On nomme « effet de système » ces comportements limitatifs des systèmes de ventilation dus à une conception ou une installation déficiente ;
- l'ajout de démarreur de type progressif sur les ventilateurs exigeant des arrêts/départs répétés ;
- la gestion informatisée du fonctionnement des systèmes de ventilation pour suivre les temps de marche, les points de consigne, les alarmes, etc ;
- le remplacement des garnitures des registres d'air extérieur, ainsi que le réajustement fréquent de leurs lames et des actuateurs.

1.7 POSE DE CALORIFUGE

Une autre mesure d'efficacité énergétique concerne la pose de calorifuge sur la tuyauterie et les conduits. Le calorifuge aide à maintenir une température contrôlée pour les fluides de procédé transportés d'un point à l'autre. Il peut également servir à protéger le personnel contre les températures extrêmes d'équipements et ainsi augmenter leur confort.

Le choix du bon type de calorifuge ainsi que son épaisseur optimale pour une application de procédé donnée sont très importants. Ces deux points font souvent l'objet de vérification lors de la recherche de l'efficacité énergétique dans une usine. Il en est de même pour ce qui a trait à l'isolation à haute efficacité des fours et des principaux équipements de chauffage d'un procédé.

Une attention particulière doit être portée à la portion non traditionnellement calorifugée de la tuyauterie de vapeur comme les soupapes ou autres accessoires sur lesquels il faut prévoir un accès pour l'entretien. Il est d'ailleurs possible de se procurer des revêtements isolants amovibles, habituellement maintenus par des velcros, pour permettre de limiter les déperditions de chaleur sans réduire l'accès à ces équipements.

2.0 MESURES D'EFFICACITE ENERGETIQUES DANS L'INDUSTRIE DE L'ALUMINIUM

Comme il a été mentionné antérieurement, cette section portera plus particulièrement sur les mesures d'efficacité énergétique concernant l'optimisation de la position des brûleurs à l'intérieur de fours réverbères, l'amélioration de l'étanchéité des fours, ainsi que l'installation de récupérateurs de chaleur sur les cheminées des fours de fusion.

2.1 OPTIMISATION DE LA POSITION DES BRULEURS POUR FAVORISER LE TRANSFERT DE CHALEUR DANS LES FOURS REVERBERES

Il existe peu de données disponibles sur la localisation idéale d'un brûleur à l'intérieur d'un four. Cette localisation est déterminée pour chaque installation et dépend de divers paramètres comme la localisation des portes du four et de l'entrée de la cheminée. La majorité des renseignements seront obtenus auprès de manufacturiers de brûleurs qui peuvent sélectionner le meilleur type de brûleur pour un four donné, simuler leur fonctionnement dans un four existant et déterminer leur rendement. Ces manufacturiers connaissent généralement bien les spécificités de la fabrication de l'aluminium et possèdent les types de brûleurs pour ses applications. Des renseignements peuvent être également obtenus auprès de manufacturiers de fours ou auprès de consultants dans le domaine de la combustion industrielle.

L'économie d'énergie découlant directement de la relocalisation de brûleurs dans un four peut s'avérer être difficilement quantifiable dans plusieurs cas. L'efficacité de cette mesure sur le rendement du four et de sa production est un atout important dans l'atteinte de l'objectif de consommation efficace de l'énergie de l'usine.

Nous remarquons toutefois que pour les procédés avec combustion, le classement des priorités des mesures à implanter dans une usine prend souvent la forme suivante, par ordre décroissant :

- le réglage de la combustion des brûleurs en fonction de la régulation du débit, de la pression et de l'excès d'air ;
- la diminution des pertes de chaleur du four par calorifugeage ou ajout de calfeutrage, par réduction des ouvertures et réparation des fissures ;
- la réparation ou les modifications apportées aux brûleurs ;
- l'adaptation de la puissance de chauffe à la charge d'aluminium par automatisation ou ajout de contrôles pour la modulation du chauffage ;
- le préchauffage de la charge d'aluminium par l'allongement des fours (lorsqu'il est physiquement possible de le réaliser) ;
- la récupération d'énergie pour le préchauffage de l'air de combustion du brûleur ;
- la reconstruction ou des modifications majeures apportées au four pour en augmenter son efficacité.

On remarque que l'atteinte de l'objectif de consommation énergétique est donc étroitement liée à l'amélioration du rendement énergétique du four et à l'efficacité de la combustion des brûleurs lors de l'établissement de ces priorités. En tenant compte de la production d'aluminium du four de procédé, son rendement énergétique peut dépendre de plusieurs facteurs, mais de façon générale, principalement de ses dimensions, de son âge ou état, ainsi que de la qualité de construction de son foyer, selon les matériaux utilisés et la superficie de ses ouvertures.

L'efficacité de la combustion des brûleurs du four est quant à elle directement liée aux caractéristiques de la combustion selon des paramètres chimiques tels que l'excès ou le manque d'air qui font perdre, par les fumées de cheminée, l'énergie sensible non libérée des gaz de combustion imbrûlés, en plus de la chaleur latente qui y subsiste. La température de ces gaz de combustion à la sortie du four et la température de l'air de combustion aux brûleurs sont les principaux paramètres physiques à considérer lors de l'évaluation de l'efficacité globale d'un four de procédé.

Nous pouvons définir la combustion comme une réaction chimique dans laquelle un oxydant réagit rapidement avec un combustible pour libérer son énergie thermique emmagasinée sous la forme de gaz à haute température. Cette réaction, lorsqu'elle est théoriquement optimale, est appelée combustion stoichiométrique. Elle survient lorsque la quantité d'agent d'oxydation théoriquement nécessaire, sous forme d'oxygène dans l'air ou d'un mélange à base d'oxygène, est ajoutée à un combustible.

Cette combustion théorique est cependant impossible à atteindre dans un appareil de combustion de type commercial où le mélange air/combustible n'est jamais parfaitement distribué. C'est pourquoi, en pratique, on ajoute toujours une quantité additionnelle d'air appelée « excès d'air » pour assurer que la combustion se fasse de façon complète. Ce supplément d'air varie selon plusieurs facteurs et se situe généralement autour de 10%. L'excès d'air peut varier également selon la modulation de production de chaleur demandée au brûleur du four. En général, un brûleur opérant à charge partielle a plus de difficultés à obtenir un mélange air/combustible adéquat. C'est pourquoi on ajuste souvent l'excès d'air à la hausse pour une faible charge. Par exemple, un brûleur ayant 10% d'excès d'air à pleine capacité pourra en utiliser jusqu'à 30% lorsqu'il fonctionnera à 25% de sa capacité.

Ce surplus de consommation énergétique, utilisé principalement comme sécurité, doit donc être optimisé et être vérifié sur une base régulière, afin d'assurer une saine gestion de la consommation énergétique du procédé de combustion.

La qualité d'une combustion est exprimée par le taux de combustion, qui varie selon le taux de réaction chimique entre les composantes du combustible et l'oxygène, le taux auquel l'oxygène est fourni au combustible, c'est-à-dire le mélange air/combustible, et la température maintenue dans la région de la combustion.

Plusieurs développements dans la technologie des brûleurs au gaz naturel et/ou au mazout ont été réalisés au cours des dernières années et ont eu d'importantes applications dans l'industrie de l'aluminium. Plusieurs manufacturiers offrent des brûleurs dits "à bas excès d'air" pouvant baisser l'excès d'air à une valeur de 5%.

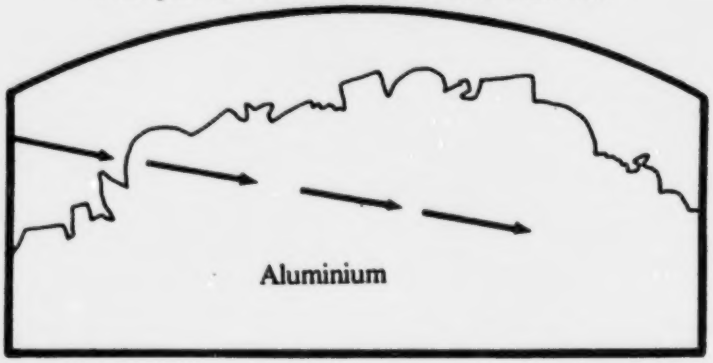
Les fours réverbères typiques d'aluminium utilisent le transfert de chaleur par rayonnement des murs et du toit des fours pour chauffer la charge d'aluminium. L'introduction du transfert de chaleur par convection dans les fours de fusion, de chauffage et de maintien résulte souvent en une meilleure efficacité de consommation d'énergie et une augmentation de production du four.

Présentée de façon sommaire, la convection thermique est définie comme le mode de transfert de chaleur impliquant un transfert d'énergie par le mouvement de fluides et une conduction thermique entre les molécules. La turbulence des flots est un paramètre important du rendement thermique de ce type de transfert de chaleur. Le rayonnement thermique, quant à lui, est le transfert d'énergie électromagnétique d'une source à une autre. Le taux de transfert d'énergie par rayonnement augmente rapidement lorsque la température croît.

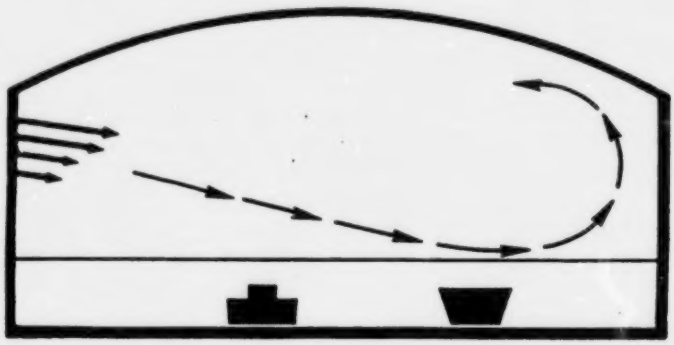
Le transfert de chaleur par convection peut s'effectuer par les brûleurs qui transmettent une portion de leur énergie cinétique aux produits de combustion. De plus, le processus de fonte est accéléré sachant que l'aluminium solide possède un coefficient de conductivité thermique plus élevé que l'aluminium sous forme liquide. Plusieurs fours ont été munis ou modifiés depuis les années 1980 avec des brûleurs à convection, souvent appelés brûleurs à haute vélocité.

Dans un four conventionnel de fusion de l'aluminium avec chargement direct bien conçu, la localisation des brûleurs et leur jet de flamme créent une situation très efficace de chauffage au début de la fusion. L'aluminium solide absorbe très rapidement la chaleur des produits de la combustion, lorsque ceux-ci touchent directement la pile de métal. En dirigeant une grande quantité de gaz turbulents à haute vélocité sur la charge de métal froid, les flammes et les gaz de combustion agissent comme une torche pénétrant à travers cette pile. Il en résulte que les gaz de combustion quittant le foyer du four à cette étape de la fusion sont à une température relativement basse. Le transfert de chaleur par convection s'effectue alors sur toutes les surfaces de la charge d'aluminium exposées au courant de gaz chauds, alors que le transfert de chaleur par rayonnement n'intervient que sur les surfaces de cette charge directement exposées aux surfaces du four.

Figure 3
Transfert de chaleur dans un four réverbère



Excellent transfert de chaleur des gaz de combustion
à la charge d'aluminium, avec faibles températures de sortie.



Transfert de chaleur inefficace par convection,
températures de sortie des gaz de combustion élevées.

L'augmentation de l'efficacité obtenue avec un brûleur à haute vélocité dépend souvent de la géométrie de la charge d'aluminium. Les rebuts en pile représentent une charge plus poreuse qu'un lingot solide, et bénéficieront plus de l'implantation de ce type de brûleur. Une combustion partielle intervient dans le bloc du brûleur à haute vélocité ainsi qu'une stabilisation de la flamme, ce qui permet de réaliser une combustion complète avant que la flamme ne touche le bain de métal, diminuant ainsi les pertes de métal et la formation d'écume à la surface du bain d'aluminium.

La température des gaz de combustion augmente de façon substantielle lorsque la charge d'aluminium commence à devenir plane et offre moins d'obstacles solides à la flamme entre le brûleur et l'entrée de la cheminée du four.

L'optimisation de la fusion réside alors à rechercher la meilleure position des brûleurs dans le four et à modifier leur angle de flamme afin d'obtenir le meilleur rendement des brûleurs à convection. Ces derniers sont généralement localisés plus bas dans le four, avec un angle de flamme vers le bas et dirigé directement sur la charge d'aluminium, alors que les brûleurs conventionnels sont installés à l'horizontal dans la partie haute du four.

Figure 4

Localisation et orientation de brûleurs de four avec brûleurs à rayonnement

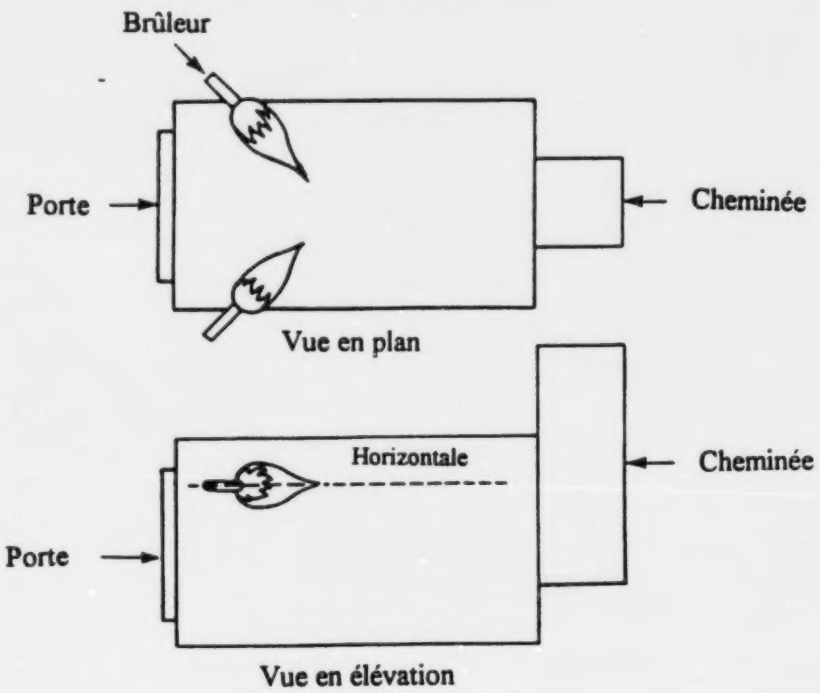
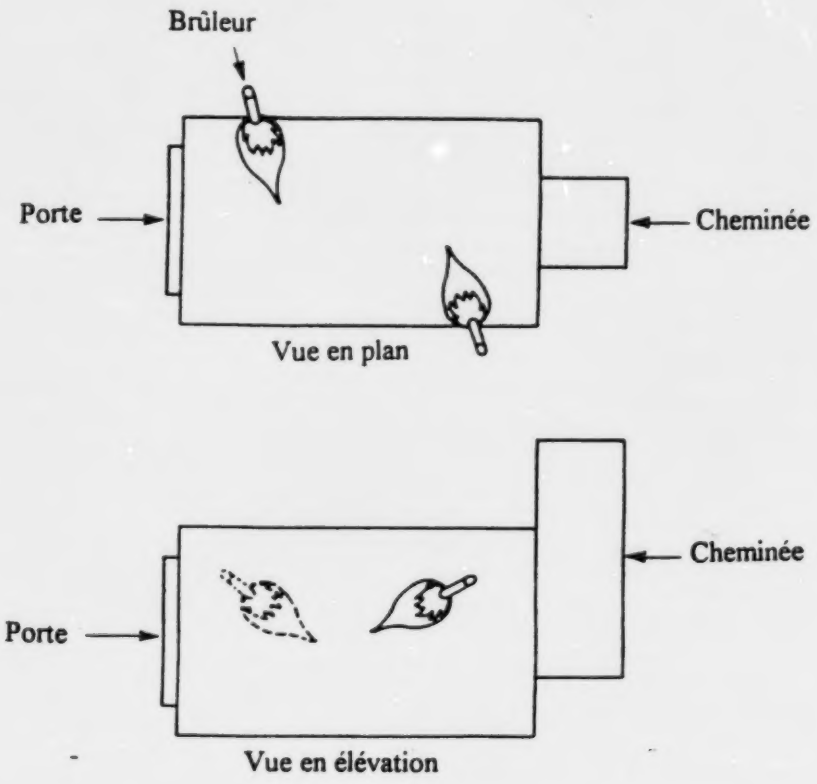


Figure 5

Localisation et orientation de brûleurs de four réverbère avec brûleurs à convection



BRÛLEURS AVEC CONVECTION

Les avantages obtenus avec les brûleurs à convection deviennent toutefois moins importants lorsque la charge d'aluminium est fondue et forme un bain avec une surface relativement plane. Toutefois même lors de cette situation, le mouvement des gaz de combustion sur la surface du bain d'aluminium liquide diminue sa tension de surface, ce qui permet d'améliorer le gradient de chaleur

comparativement à une condition de simple rayonnement de chaleur par l'uniformisation des températures dans le four.

Plusieurs études ont démontré que l'utilisation de brûleurs à convection amène une diminution des surfaces de murs et de toit d'un four en raison de la réduction du transfert de chaleur par rayonnement. De plus, la température des gaz de combustion étant moins élevée, les pertes de chaleur par ses composantes sont réduites, sans changement significatif au niveau des pertes de métal lors de la fusion. Comme les températures des surfaces réfractaires sont moins élevées durant la fusion, la durée de vie du réfractaire tend à augmenter, et mène à une diminution des coûteuses réparations de réfractaire et du temps d'interruption de production.

Par ailleurs, les gaz de combustion générés par un four et évacués par la cheminée constituent une source de pollution importante et ses polluants peuvent être groupés en quatre (4) catégories, soient :

- les produits de combustion incomplète du combustible comme la fumée, la suie, des composés organiques, le monoxyde de carbone (CO) et des hydrocarbones gazeux ;
- les oxydes d'azote (NO_x) ;
- les émissions résultantes des contaminants du combustible comme les oxydes de soufre (SO_x) les cendres et certaines traces de métaux ;
- les émissions résultant des additifs ajoutés à la combustion.

Le contrôle de l'émission de ces polluants est réglementé et fait l'objet de nombreuses discussions. Dans le cadre de ce guide, nous ne considérerons que les NO_x qui sont des gaz se formant lors d'une combustion à des hautes températures de flamme, soit au-dessus de 1090 °C. L'abréviation NO_x comprend les NO et

NO_2, le NO réagissant avec l'oxygène (O_2) contenu dans l'air pour former du NO_2 et de l'ozone (O_3) et ce, plus rapidement encore en présence de rayons solaires et de certains composés organiques volatils présents dans l'atmosphère. Le NO_2 est une des causes de smogs photochimiques et des pluies acides ; et du fait, un sévère polluant environnemental pour la santé, lequel doit être contrôlé, tout comme l'ozone, qui lorsque présent au niveau du sol, présente un risque pour la respiration.

En général, les principaux paramètres considérés lors de l'analyse de l'émission de NO_x du four vers l'atmosphère sont le type de brûleur et son patron de jet de chaleur, le taux de chaleur du four relativement au volume de son foyer, le temps de rétention des gaz de combustion, l'arrangement de la charge d'aluminium par rapport à la flamme, le type de construction du réfractaire ainsi que les fuites d'air à travers les ouvertures présentes du four. Les mécanismes de contrôle d'émission de NO_x règlent principalement, pour un combustible donné, la température de crête de la flamme, les concentrations limites d'oxygène localisées dans la flamme et la durée de la combustion à la température de crête. Ces derniers paramètres s'ajoutent à l'étude de l'ensemble des composantes du four au niveau de son design, de sa construction, de son entretien ainsi que de tout l'environnement et le procédé de combustion.

La bonne qualité d'une combustion dans un four est essentielle à la production de chaleur. Cette bonne qualité de combustion aura une influence directe sur son efficacité énergétique et sur sa faible émission de polluants, tels les NO_x. Pour obtenir cette bonne qualité de combustion, le premier critère requis réside en la bonne sélection du brûleur. Lorsqu'il est installé dans un four, les caractéristiques particulières du brûleur sont cependant intégrées à celles des autres composantes du four pour créer un ensemble. La construction du brûleur, sa capacité de

chauffage, son degré de modulation de flamme, sa localisation et son installation dans le four sont les principaux points à définir pour une bonne efficacité de combustion. Le nombre de brûleurs utilisés dans un four est souvent établi de façon à produire une uniformité des températures dans le four et obtenir une plage de modulation de la quantité de chaleur à fournir.

2.2 AMELIORATION DE L'ETANCHEITE DES FOURS

L'efficacité énergétique au niveau de l'amélioration de l'étanchéité des fours utilisés dans l'industrie de l'aluminium débute par l'analyse d'une saine gestion de l'ouverture et de la fermeture des portes des fours, de concert avec les exigences de production. Les frais coûteux de remplacement ou d'ajout de nouveaux équipements peuvent parfois être évités en s'assurant simplement de minimiser le nombre et le temps d'ouverture des portes des fours. Cette gestion est souvent très profitable et doit être considérée avant même qu'une mesure aussi simple et évidente que le scellement des ouvertures du four. D'autres mesures d'efficacité énergétique peuvent être par la suite implantées afin de tenter de diminuer les pertes de chaleur des fours.

Pour améliorer l'étanchéité des fours, il faut d'abord connaître plusieurs paramètres comme la pression optimale à l'intérieur du four, le tirage du four et les phénomènes reliés aux différences de pressions de l'air, du combustible et des gaz de combustion lors de leur passage dans le four et au travers des équipements.

Plusieurs types de tirage existent dans le four. Ils peuvent être forcés par l'apport d'air et de combustible avec une pression positive dans la chambre de combustion, ainsi que naturels ou induits par la pression négative à la sortie du four. Cette pression négative amène les gaz de combustion à évacuer la chambre de

combustion par effet de cheminée. Elle peut également être mécanique par l'action de ventilateurs de cheminée ou d'autres équipements.

Une pression à l'intérieur d'un four est dite « positive » lorsqu'elle est supérieure à la pression atmosphérique. Elle a le désavantage de pousser la chaleur du four vers les portes et ouvertures, augmentant ainsi les coûts d'entretien du four en raison de la détérioration des garnitures des ouvertures par l'action de la chaleur. Lorsqu'elle est négative, elle a le désavantage de s'ajouter à l'excès d'air du brûleur du four, réduisant alors son efficacité et produisant ainsi un refroidissement partiel de la charge d'aluminium, une mauvaise uniformité des températures dans le four et dans le bain de métal liquide et souvent une atmosphère d'oxydation indésirable. Une pression négative sera toutefois plus sécuritaire pour le personnel circulant autour du four. L'obtention d'une pression neutre dans un four serait une situation idéale, mais est difficile à maintenir. Le compromis est alors de maintenir un équilibre des pressions à l'intérieur du four afin d'optimiser les avantages sur la production et diminuer les inconvénients sur le personnel et les équipements. La tendance est donc de garder une pression légèrement positive à l'intérieur du four.

Plusieurs mécanismes peuvent être utilisés afin de maintenir un gradient de pression à l'intérieur du four, allant de positif dans la partie haute du four, neutre au niveau des portes manipulées par le personnel et négative dans la région basse de la cheminée. Cette pression négative est obtenue par une résistance variable avec l'action de mécanismes comme des registres motorisés ou un entraînement à vitesse variable sur le ventilateur d'évacuation de la cheminée. Le fonctionnement de ces mécanismes est généralement réglé par un automate, en rétroaction avec d'autres paramètres dont principalement la séquence de fonctionnement des brûleurs. D'autres facteurs secondaires comme la pression à l'intérieur du bâtiment, l'effet

des vents sur le tirage de la cheminée ou le coulage d'air par les équipements, viennent influencer le contrôle de la pression maintenue dans le four.

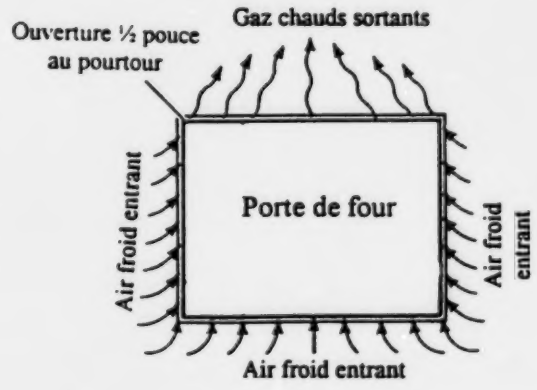
L'évaluation de l'énergie perdue par les infiltrations d'air est difficilement quantifiable et nécessite une étude particulière pour un four donné. Des facteurs comme les dimensions des fissures et leur position dans le four, ainsi que le nombre d'ouverture des portes du four doivent être considérés. Plusieurs utilisateurs d'anciens fours tentent parfois de compenser leur mélange air/combustible au brûleur afin d'ajuster le degré de richesse de mélange, et utiliser l'air qui s'infiltre comme source d'oxygène, diminuant ainsi son impact négatif sur le rendement de la combustion. L'excès d'air au brûleur est alors fréquemment corrigé par l'analyse du pourcentage d'oxygène dans les gaz de combustion d'un four donné.

Les infiltrations d'air causées par une pression négative dans les régions des ouvertures à l'intérieur d'un four peuvent avoir un impact notable sur l'émission de NO_x, en déréglant le niveau d'excès d'air du système, et en procurant plus d'oxygène disponible au brûleur pour la formation de NO_x. Cet air se mélange alors avec l'enveloppe de la flamme pouvant créer de fortes concentrations locales d'oxygène dans les zones de hautes températures de la flamme du brûleur. Le contrôle du maintien de la pression à l'intérieur du four est donc souvent une technique efficace pour améliorer le rendement du four, mais également pour limiter la production de NO_x.

D'autres mesures peuvent être envisagées selon les équipements installés dans l'usine mais il est très important de vérifier leur faisabilité et leur impact sur la production. Par exemple, l'installation d'équipement créant un rideau d'air forcé lors de l'ouverture d'une porte peut être envisagée afin de diminuer les infiltrations et exfiltrations d'air d'un four. L'équipement disponible sur le marché doit alors

être adapté au four et être capable de fonctionner à de hautes températures, sans gêner les manipulations du personnel ni nuire à sa sécurité. Ce type de mesure est peu populaire à cause des inconvénients qu'impose son installation. La figure 6 ci-dessous montre un schéma typique du mouvement de l'air autour d'une porte de four causé par son manque étanchéité et un mauvais contrôle des pressions.

Figure 6
Débit d'air entrant par une ouverture de ½ pouce autour d'une porte de four



Finalement, il est important de vérifier que le brûleur soit installé selon les recommandations du manufacturier, et d'assurer un bon entretien de ce dernier. En effet, une des causes principales de bris de brûleurs et de four est l'expansion du réfractaire et les fuites des gaz de combustion entre l'enveloppe extérieure du four et le réfractaire, surtout dans le secteur du support du brûleur au four.

2.3 INSTALLATION DE RECUPERATEUR DE CHALEUR SUR LES CHEMINEES DES FOURS DE FUSION D'ALUMINIUM

Les gaz chauds de combustion d'un procédé de fusion, de maintien et d'alliage de l'aluminium contiennent une quantité de chaleur considérable. Afin de conserver cette énergie, il est important de tenter de récupérer la plus grande partie de cette chaleur perdue en abaissant la température finale d'évacuation des gaz de combustion vers l'atmosphère.

Cette section du guide traite de la faisabilité d'un projet de récupération de chaleur. Elle peut être définie par les trois paramètres suivants: la source de chaleur disponible, l'endroit potentiel où le rejet de chaleur sera effectué et les implications techniques et monétaires de la méthode utilisée pour le transfert d'énergie. L'analyse des endroits potentiels du rejet de chaleur dans l'usine et les différents concepts des systèmes de récupération disponibles dans l'industrie de l'aluminium seront également présentés.

2.3.1 La source de chaleur

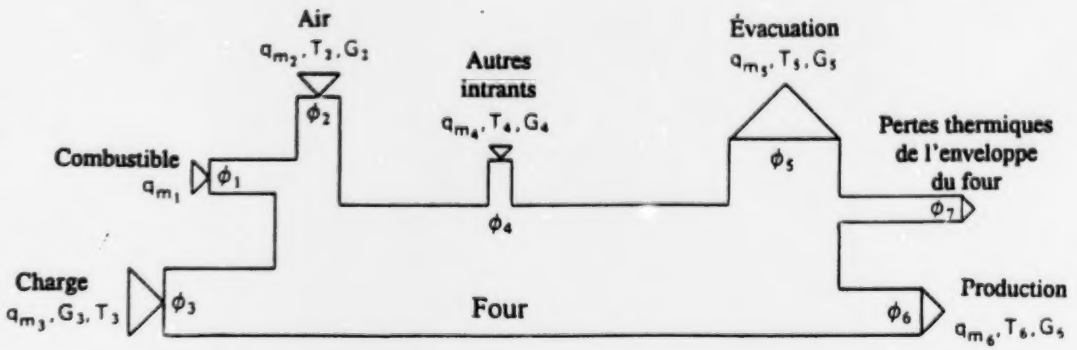
La source de chaleur disponible dans une usine doit contenir une quantité importante de chaleur sensible. Elle peut aussi contenir une quantité significative de chaleur latente, relative à son point de rosée, pouvant alors augmenter potentiellement l'énergie totale récupérable. Les paramètres importants de l'énergie récupérable d'une source de chaleur sont sa quantité, sa température et sa qualité.

La quantité d'énergie d'une source de chaleur peut être calculée par le mesurage direct de son débit et de sa température, combinée à la connaissance de la composition de son médium. Cette évaluation peut cependant être difficile à

réaliser. Elle pourra être déduite lors de l'établissement d'un bilan énergétique de tous les transferts ou débits de chaleur entrant et sortant d'un procédé. Un exemple de bilan énergétique pour un procédé de four est présenté à la figure 7.

Figure 7

Bilan typique de chaleur (à l'état stable)



Bilan de masse

$$q_{m1} + q_{m2} + q_{m3} + q_{m4} = q_{m5} + q_{m6}$$

Bilan thermique

$$\phi_1 + \phi_2 + \phi_3 + \phi_4 = \phi_5 + \phi_6 + \phi_7$$

q_m	**Débit de masse**
G	**Humidité**
T	**Température**
ϕ	**Débit de chaleur**

Ce bilan énergétique sert à confirmer l'évaluation de la quantification initiale de la chaleur disponible et l'établissement de l'efficacité thermique globale du procédé. Il peut révéler également la priorité des mesures de récupération de chaleur à établir dans un procédé. De plus, il mène, avant le début d'un projet de récupération de chaleur, à considérer toutes les alternatives possibles afin d'améliorer l'efficacité thermique du procédé lui-même. Il est généralement plus économique de réduire la quantité de chaleur utilisée, par exemple en éliminant les

coûteuses infiltrations d'air dans le four, que de tenter de récupérer une grande quantité de rejet d'énergie générée par une opération inefficace. Il est par ailleurs préférable de considérer une mesure peu coûteuse et plus rentable comme l'ajustement de l'excès d'air aux brûleurs du four avant de considérer l'installation d'un récupérateur de chaleur.

La température de la source de chaleur est souvent le premier critère à considérer pour déterminer la viabilité d'un projet. En règle générale, plus haute sera la température de la source de chaleur, meilleure sera la rentabilité du projet.

Finalement, la qualité de la source de chaleur est habituellement le principal obstacle à un projet de récupération de chaleur. L'examen de la qualité de la source touche à l'ensemble des contaminants physiques et chimiques présents dans le rejet de chaleur, selon les profils de chaleur disponible. Ces contaminants mènent à la corrosion ou l'encrassement des échangeurs de chaleur et tendent à augmenter les frais d'entretien ou éliminer la faisabilité d'un projet.

Les profils de chaleur disponible peuvent être très variables, principalement ceux de procédés non continus. La récupération de chaleur provenant d'un débit continu est bien sûr plus rentable que celle provenant d'un procédé ayant de fréquentes interruptions ou de grandes fluctuations de production de chaleur. Il faut alors surdimensionner l'équipement pour le débit maximal de la source, ce qui tend à augmenter les coûts d'installation et diminuer la rentabilité du projet.

2.3.2 Le lieu de rejet de chaleur

L'endroit potentiel à l'intérieur du procédé où le rejet de chaleur sera effectué est un critère aussi important que la disponibilité d'une source de chaleur. La quantité de chaleur pouvant être récupérée est normalement directement proportionnelle à l'écart de température entre la source et l'endroit du rejet de chaleur.

Le principal problème associé à la qualité de l'endroit de rejet réside en son profil de demande de chaleur. Il est souhaitable que ce profil suive le plus possible celui de la production de chaleur disponible. La récupération de chaleur est extrêmement intéressante dans le cas où la chaleur disponible est réutilisée dans le procédé la générant. Dans les autres cas, l'analyse et la comparaison de la coïncidence des profils de production et de récupération de chaleur doivent être réalisées, et mèneront au choix de l'équipement nécessaire pour un fonctionnement optimal et efficace.

D'autres considérations peuvent être avantageusement envisagées pour améliorer la rentabilité d'un projet d'efficacité énergétique de récupération de chaleur, lorsqu'il est possible d'emmagasiner le surplus d'énergie d'une source de chaleur pour une utilisation ultérieure dans le procédé.

2.3.3 Les implications techniques de la récupération de chaleur

Les implications d'un projet de récupération de chaleur sont pour la plupart déterminées lors de l'analyse et de la comparaison de la coïncidence des profils de production et de récupération, comme les critères de design suivants :

- la possibilité d'isolation ou de contournement, manuel ou automatique, de l'équipement de récupération afin de permettre l'entretien, selon des critères de production comme par exemple lors de la mise en marche d'équipement, ou pour des fins de sécurité ;
- les températures et les pressions impliquées, et les contrôles nécessaires au suivi et à la sécurité ;
- les contrôles pour le fonctionnement de l'équipement et l'interface avec les contrôles existants de l'équipement de production.

À ces critères techniques de design s'ajoutent d'autres considérations techniques conventionnelles comme la réduction des pertes de chaleur du système de récupération par l'installation adéquate de calorifuge, l'ajout de l'énergie motrice supplémentaire optimisée, les précautions pour contrôler la formation de condensation non voulue et les émissions de polluants. Il faut également veiller à réduire les pertes de chaleur des gaz de combustion en amont de l'équipement de récupération installé, et les pertes de chaleur du médium ayant reçu l'énergie récupérée de ce système. L'installation d'une tuyauterie ou conduits bien calorifugés est nécessaire, tout en gardant une perte minimale de pression dans le réseau. Une attention particulière doit être portée au dimensionnement des conduits et à la tuyauterie du système de récupération, afin de tenir compte de la diminution de la densité des gaz de combustion en aval du récupérateur, ainsi qu'aux types de calorifuges sélectionnés, leurs épaisseurs et leurs installations.

Le principe de base à observer pour obtenir de faibles coûts d'installation et d'exploitation est de tendre à minimiser la distance entre la source de chaleur et son point de rejet, soit en conservant le plus possible une ligne droite entre ces deux endroits. À cet effet, il faudra souvent faire un compromis afin d'obtenir une faible perte de pression au récupérateur du côté « gaz de combustion », au risque de devoir ajouter une puissance motrice supplémentaire du côté « air ». Cette énergie est nécessaire pour créer une pression de tête capable de forcer les gaz de combustion à passer au travers du récupérateur. Le coût de cette énergie supplémentaire doit être déduit de l'économie d'énergie réalisée par l'installation de l'équipement de récupération.

L'un des critères techniques importants intervenant dans l'étude de faisabilité et du calcul de la rentabilité de l'installation d'un système de récupération est la détermination de la température du point de rosée des composantes des gaz de

combustion. La chaleur latente de condensation contenue dans les vapeurs des gaz de combustion est un apport important de l'énergie récupérée par l'équipement de récupération. Ce surplus d'énergie récupérée est intéressant sauf s'il s'accompagne de condensation non désirée de liquides corrosifs pouvant détériorer les composantes du système de récupération. Le degré de résistance à la corrosion de l'équipement choisi et de toutes ses composantes influence beaucoup son coût d'achat, sa durée de vie utile et son entretien. La formation de liquides non corrosifs peut également être un problème majeur dans le cas de gaz de combustion sales, évacués par la cheminée, menant à la formation de boues visqueuses dans l'équipement de récupération.

Les différentes températures de point de rosée des gaz de combustion varient directement selon l'excès d'air au brûleur et selon les concentrations de O_2, CO_2, SO_x, NO_x , et autres composantes des gaz de combustion. Pour parer à la formation de ces liquides indésirables, un facteur de sécurité est utilisé lors du calcul de la température finale des gaz de combustion, en fonction des différents points de rosée de ces composantes. Une attention particulière doit être également portée aux endroits dans le circuit d'évacuation des gaz où la vitesse d'une portion de ces gaz et la température tendent à diminuer ainsi qu'à la section de cheminée se trouvant à l'extérieur du bâtiment et qui, souvent, requerra d'être recouverte de calorifuge.

Avec le développement de meilleurs matériaux résistant à la corrosion comme la céramique, certains équipements de récupération sont maintenant conçus pour résister à la formation de condensation et sont capables de récupérer une grande partie de la chaleur latente disponible dans les gaz. Le problème de pollution par les gaz de combustion devient alors un problème relié à la façon de disposer des liquides récupérés.

2.3.4 Les utilisations potentielles de la chaleur récupérée

L'efficacité énergétique globale d'un four typique utilisant un brûleur alimenté en air froid de combustion ne dépasse pas généralement 30%. Environ 50% à 60% de l'énergie consommée par le four est perdue dans les gaz de combustion par la cheminée. Nous verrons dans cette section du guide, les actions possibles afin d'améliorer cette efficacité énergétique par l'utilisation de la chaleur récupérée, principalement pour le préchauffage de la charge d'aluminium allant au four et l'air de combustion du brûleur. La possibilité d'utiliser la chaleur récupérée à d'autres fins, comme le chauffage de fluides comme l'eau ou l'air du bâtiment, dépend des applications présentes dans l'usine et doit être étudiée sur une base particulière.

Récupération de chaleur pour le préchauffage de la charge d'aluminium

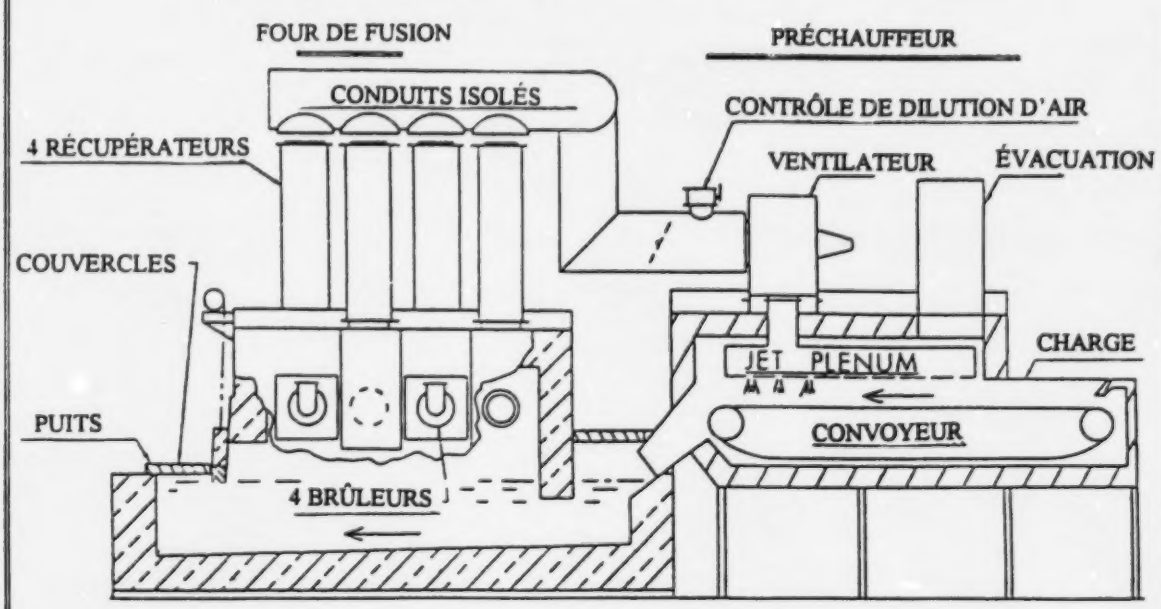
La priorité pour l'atteinte de l'objectif d'efficacité énergétique peut consister à préchauffer la charge d'aluminium avec les gaz de combustion du four. Cette priorité se doit d'être établie après s'être assurée du bon rendement de l'équipement de combustion et d'avoir optimisé le mélange air/combustible. Elle se fera toujours en portant également une attention particulière à la vérification de la température minimale obtenue des gaz de combustion à l'intérieur de la section de préchauffage, afin d'éliminer la possibilité de formation de condensation qui affecterait la qualité de la production du métal et endommagerait l'équipement.

De nombreux projets de récupération ont été réalisés avec succès sur des fours de fusion d'aluminium. Ce type de projet peut être initié par une étude auprès de consultants qualifiés afin de déterminer toutes les implications et sa faisabilité. Il peut consister à modifier les équipements existants à peu de frais ou exiger un investissement plus important par l'ajout de nouveaux équipements ou une réorganisation de la production. Dans certains cas, l'installation de récupérateurs

ou d'échangeurs indirects de chaleur peut permettre de retourner une partie importante de l'énergie des gaz de combustion dans le procédé, sans que ces derniers ne viennent en contact avec la charge d'aluminium.

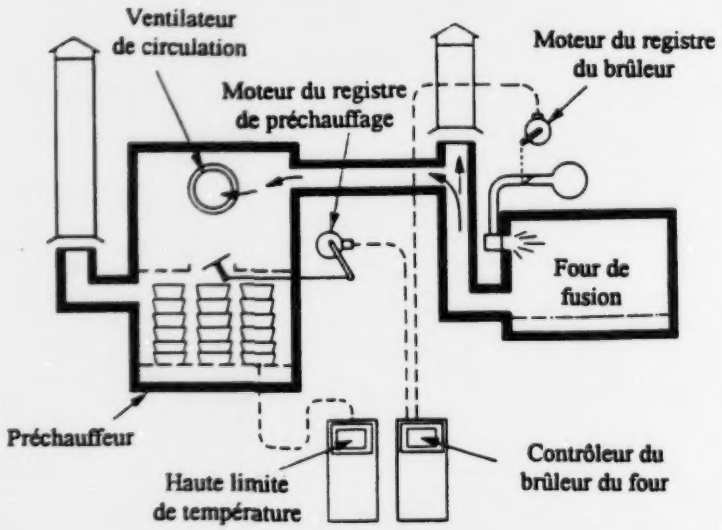
Dans le cas d'un four à chargement continu, comme montré à la figure 8 ci-dessous, l'ajout ou le prolongement d'un corridor ou tunnel sans équipement de chauffage supplémentaire peut préchauffer la charge d'aluminium entrant dans le four. Il en résulte une diminution de la quantité de combustible requis pour chauffer la même quantité d'aluminium.

Figure 8
Four avec tubes radiants muni de récupérateurs et d'un préchauffeur



Dans le cas de fours à chargement non continu, le préchauffage de la charge d'aluminium peut également être réalisé, cependant, il serait peut-être plus profitable de considérer de modifier le chargement pour le rendre continu. La figure 9 montre un four de préchauffage construit près d'un four de fusion et qui récupère la chaleur du four de fusion. La charge d'aluminium doit alors être transférée rapidement vers ce dernier pour minimiser son refroidissement. Une autre méthode pouvant être envisagée est l'emploi de deux fours à chargement non continu en parallèle où lorsque possible, les gaz de combustion d'un four servent à préchauffer la nouvelle charge de l'autre four.

Figure 9
Exemple de récupération de chaleur avec deux fours



L'effet du préchauffage de la charge d'aluminium permet d'augmenter le rendement énergétique du four et a l'avantage de ne pas augmenter la température de flamme, ni du four, ce qui conséquemment limite la formation des NO_x. Une bonne distribution du débit de chaleur dans la zone de préchauffage est absolument nécessaire pour éviter une fonte localisée de la charge ou d'avoir des zones trop froides et les problèmes qui en découlent. L'application de la récupération de chaleur peut s'avérer simple, sans implication sur la qualité de la production, rendant ainsi le procédé de chauffage plus efficace énergétiquement. Dans d'autres cas, les contraintes techniques et physiques peuvent être plus importantes pour ne pas diminuer la qualité de production.

Récupération de chaleur pour le préchauffage de l'air de combustion

Le préchauffage de l'air de combustion par la récupération de la chaleur contenue dans les gaz de combustion se révèle une mesure d'efficacité énergétique couramment rencontrée dans l'industrie de l'aluminium et demeure perçue comme celle étant la plus facile à implanter au niveau technique. Elle présente également la meilleure rentabilité, principalement dans le cas de fours de fusion ou de maintien, où la principale perte de chaleur se retrouve dans l'évacuation des gaz par la cheminée. De même, la rentabilité de ce type d'économie d'énergie est donc directement liée à la température des gaz de combustion et au pourcentage d'excès d'air dans le mélange air/combustible des brûleurs.

Le choix d'un récupérateur métallique ou en céramique doit se faire en fonction des températures des gaz et de la nature du combustible. Beaucoup d'efforts ont été réalisés dans le domaine de la recherche sur la fabrication d'échangeurs de chaleur en céramique pouvant résister à de hautes températures de fonctionnement, avec de

meilleures propriétés de résistance aux chocs thermiques et à la corrosion, et pouvant être installés plus facilement que les récupérateurs métalliques.

Les principaux avantages du préchauffage de l'air de combustion sont notamment :

- l'obtention de températures plus élevées de flamme du brûleur. Le préchauffage de l'air de combustion de 15°C à 540°C permet d'augmenter la température théorique de la flamme de gaz naturel d'environ 1950 °C à environ 2175 °C, menant alors à l'amélioration du transfert de chaleur au four par le rayonnement de la flamme. Les températures plus chaudes de l'air et de la flamme contribuent également au craquage thermique ou polymérisation des molécules de combustible, ayant pour effet de produire une flamme plus lumineuse améliorant d'autant plus son rayonnement ;
- une chaleur disponible plus élevée dans le four et moins d'énergie perdue par la cheminée. La capacité de l'aluminium, solide ou en phase liquide, d'absorber la chaleur d'une flamme ayant un fort rayonnement, permet de prévenir la surchauffe des murs et du toit du four ;
- une température plus élevée de flamme permet de produire une plus grande quantité d'aluminium par heure dans le même four. Une attention particulière doit cependant être portée par le personnel afin de ne pas surchauffer le bain de métal dans le four. Une surchauffe mène à une surconsommation de combustible, et surtout, peut augmenter les pertes de métal et détériorer la qualité de la production ;
- un rendement de procédé plus élevé. Ceci peut se manifester par une diminution de l'énergie nécessaire pour effectuer la fonte ou par une capacité accrue de chauffage du four ;
- une attention doit être portée à l'effet d'étranglement de l'air au brûleur lorsque sa température devient trop élevée. Une telle situation peut entraîner un dérèglement du ratio air/combustible ;

- dans certains cas, le gaz naturel peut devenir plus compétitif que l'électricité, spécialement pour des applications de chauffage à hautes températures obtenues grâce à un préchauffage de l'air de combustion. La conversion du type d'énergie utilisée permet alors de réaliser une économie monétaire due à la différence des coûts des énergies.

La principale contrainte du préchauffage de l'air de combustion est :

- l'obtention de niveaux plus élevés de CO et de traces de combustibles dans l'évacuation du four, ainsi que des niveaux plus élevés de NO_x. Ces phénomènes sont le résultat direct d'une combustion plus rapide et à une plus haute température de combustion. Ils mèneront à une surveillance accrue afin d'en limiter la formation.

Le calcul de la performance d'un système de récupération est souvent calculé selon deux méthodes :

1. Le pourcentage d'économie en combustible calculé comme suit :

$$\% \text{ Économie} = 1 - \frac{(\% \text{ Chaleur disponible sans l'échangeur})}{(\% \text{ Chaleur disponible avec l'échangeur})} * 100$$

Le tableau 1 suivant montre le pourcentage d'économie de combustible par la récupération de la chaleur des gaz de combustion pour le préchauffage de l'air du brûleur. Il est à noter que ces pourcentages sont approximatifs et relatifs à la valeur calorifique réelle du combustible utilisé et de l'excès d'air au brûleur.

Tableau 1

Pourcentage d'économie de combustible par le préchauffage de l'air de combustion

Température Gaz de combustion (°C)	Température de l'air de combustion (°C) 300	400	500	600	700	800	900
600	14	19					
700	15	20	24				
800	16	21	25	28			
900	17	22	27	30	33		
1 000	18	24	29	33	36	38	40
1100	20	26	31	35	38	40	43
1 200	23	29	34	39	41	44	47
1 300	26	32	38	43	46	49	51

Combustible : Gaz naturel à 10% d'excès d'air

Comme la chaleur disponible varie avec le combustible sélectionné et selon l'évaluation de la quantité d'excès d'air, les tableaux d'économie de combustible publiés par les manufacturiers d'équipement diffèrent légèrement d'une source à l'autre.

2. Le pourcentage d'efficacité

$$\% \text{ Efficacité} = \frac{(T^\circ \text{ air après l'échangeur} - T^\circ \text{ air avant l'échangeur})}{(T^\circ \text{ gaz avant l'échangeur} - T^\circ \text{ air avant l'échangeur})} * 100$$

L'efficacité peut être considérée comme le rapport entre l'élévation de la température de l'air de combustion actuelle à travers l'échangeur et l'élévation théorique maximale de température qui pourrait être obtenue. Ce maximum théorique pourrait être obtenu si l'air devient aussi chaud que les gaz de

combustion, cependant étant thermodynamiquement impossible, l'efficacité sera toujours inférieure à 100%.

2.4 SYSTEMES DE RECUPERATION DE CHALEUR

Il existe deux principales méthodes de récupération de chaleur dans les procédés industriels de combustion, soient par des récupérateurs ou par des régénérateurs. Ces deux types d'échangeurs captent l'énergie contenue dans des gaz de combustion et la recycle dans le procédé, la plupart du temps pour le préchauffage de l'air de combustion.

Un récupérateur est un équipement où les fluides chaud et froid circulent simultanément dans un échangeur et sont séparés l'un de l'autre par une cloison ou une barrière physique, installée entre les deux fluides caloporteurs. Les fluides chaud et froid ne sont pas en contact dans ce type d'équipement. Un Regénérateur, quant à lui, se caractérise comme un lieu d'emmagasinement de l'énergie y circulant et sa capacité de la retourner au procédé. Un Regénérateur fonctionne avec un cycle de chargement et un cycle de déchargement d'énergie.

2.4.1 Les récupérateurs de chaleur

Le transfert de chaleur avec un récupérateur sert normalement à préchauffer l'air de combustion. Il s'effectue par la cloison installée entre l'air et les gaz de combustion. L'économie d'énergie générée est souvent de l'ordre de 30% dans le cas où l'air de combustion est relativement froid. Les récupérateurs existants sur le marché offrent un grand choix de dimensions et de plages de températures d'opération ainsi qu'une bonne disponibilité de modèles compacts et efficaces. Leur technologie a fait ses preuves et est largement reconnue dans l'industrie du chauffage de procédé. Les récupérateurs de chaleur peuvent être conçus pour

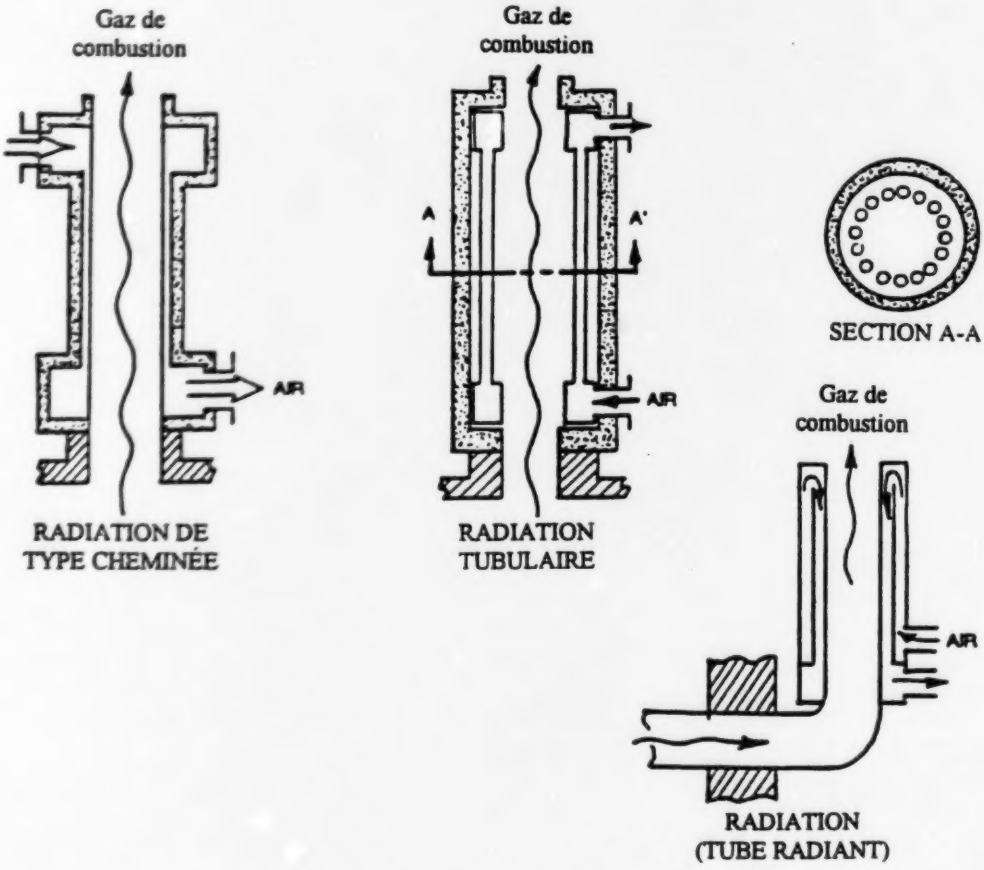
fonctionner avec des débits parallèles, à contre-courant ou une combinaison de ces deux types d'écoulement.

Les récupérateurs de chaleur peuvent être essentiellement divisés en deux types, soient à rayonnement et à convection. Leur classification réfère au mode dominant du transfert de la chaleur des gaz de combustion aux cloisons du récupérateur. On notera que par la nature même du type de transfert de chaleur, la récupération par convection sera en règle générale utilisée avec des températures de gaz de combustion inférieures à 1 000 °C, et la récupération par rayonnement avec des températures au-dessus de cette limite. Quelques modèles hybrides de récupérateurs sont également disponibles et tirent profit des avantages du transfert de chaleur par rayonnement et par convection.

Le récupérateur à rayonnement est souvent de grandes dimensions avec une faible perte de pression du côté des gaz de combustion, ainsi qu'une conception structurale légère et une capacité pour des gaz à des températures de 1 200 °C à 1 300 °C. Sa construction consiste généralement en deux conduits installés l'un dans l'autre, et le récupérateur est inséré en remplaçant une section de la cheminée existante d'un four.

La température de l'air de combustion à la sortie de l'échangeur peut être aussi élevée que 650 °C, et varie principalement selon les températures des gaz de combustion et le débit d'air de combustion du brûleur. Un ventilateur doit souvent être ajouté afin d'obtenir de l'air forcé avec une plus forte perte de pression sur le côté air de combustion de l'échangeur. Leur efficacité de récupération peut être de 40% en fonction des paramètres rencontrés dans l'application de chauffage.

Figure 10
Récupérateurs à rayonnement



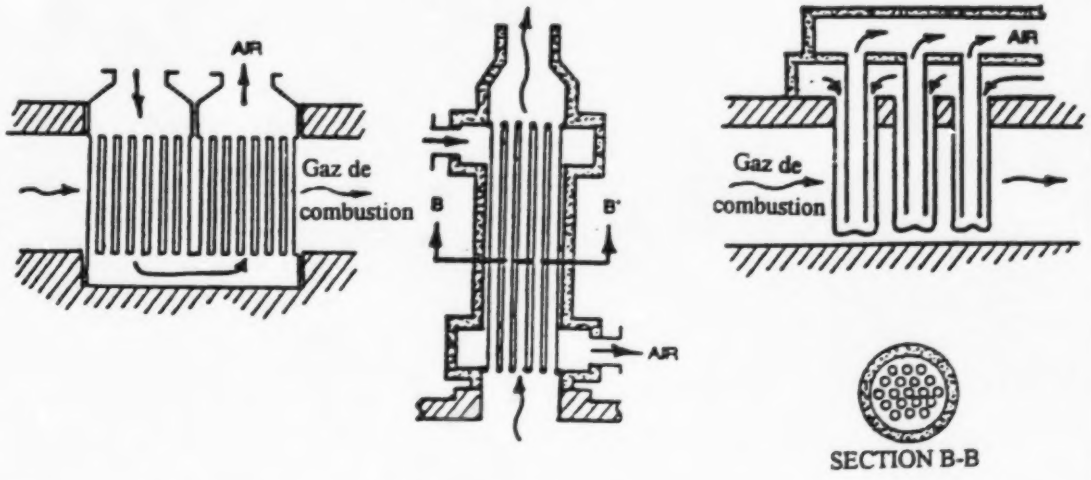
Le récupérateur à rayonnement est recommandé pour des applications à hautes températures comme la fusion de l'aluminium. Ils sont, pour la plupart, conçus avec des débits parallèles afin de protéger de la surchauffe le côté de l'entrée des gaz de combustion à l'échangeur. Un mécanisme de protection de surchauffe est souvent installé dans le récupérateur et son fonctionnement est généralement contrôlé par un thermocouple installé dans le récupérateur. Ce système réagit

généralement en admettant de l'air pour dilution dans le conduit d'admission des gaz chauds du récupérateur, ou en purgeant une partie de l'air préchauffé de la sortie d'air du récupérateur, afin d'y maintenir un débit suffisant. D'autres types de contrôle de sécurité sont disponibles, et font souvent partie intégrante du système de contrôle.

Dans le cas d'un récupérateur construit en acier inoxydable, plusieurs manufacturiers recommandent de ne pas utiliser leur récupérateur lors de l'ajout de chlore dans le bain d'aluminium en fusion, ce qui force l'installation d'un conduit de contournement à l'échangeur et l'ajout de registres. Une précaution doit également être portée pour prévenir une contre-pression dans l'échangeur lors d'un contournement des gaz de combustion, afin d'éliminer le risque de détérioration.

Le second type de récupérateur disponible est un échangeur utilisant principalement le mode de transfert de chaleur par convection. L'efficacité d'un récupérateur à convection varie selon les degrés de turbulence, vélocité et viscosité des fluides y circulant.

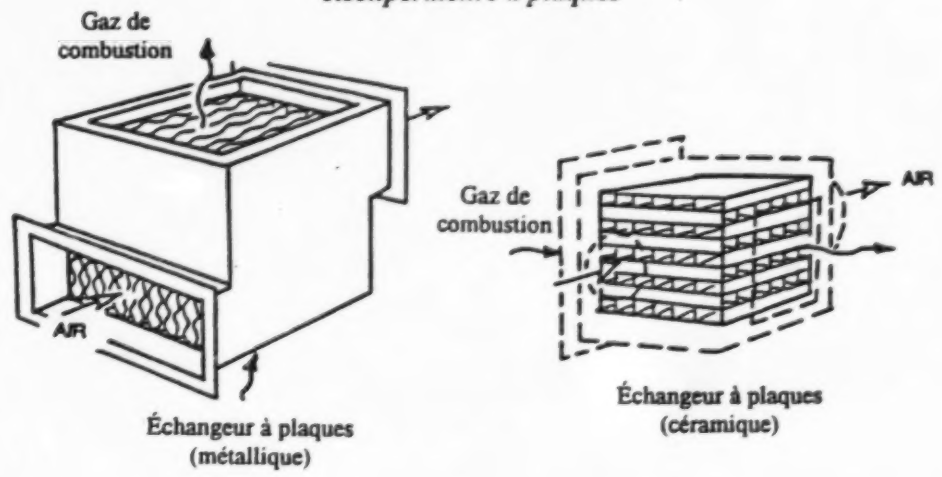
Figure 11
Récupérateurs à convection



Le récupérateur à convection est également de grandes dimensions, avec une perte de pression du côté des gaz de combustion supérieure à celle par rayonnement. Il est généralement de conception plus élaborée et possède une capacité pour des gaz à des températures allant jusqu'à 1 000 °C. La température de l'air de combustion à la sortie de l'échangeur peut atteindre 540 °C selon la température des gaz de combustion et le débit d'air de combustion du brûleur. Son efficacité de récupération peut être de l'ordre de 30% et plusieurs modèles sont disponibles. Ils sont habituellement fabriqués en un alliage d'acier et peuvent être disponibles en céramique. Les gaz de combustion circulant dans ce type d'échangeur de chaleur doivent être généralement propres. Le récupérateur à convection peut également posséder un mécanisme de protection contre la surchauffe, avec dilution ou à purge, selon l'application. Un ventilateur est souvent ajouté pour compenser les pertes de pression de l'échangeur sur le côté air de combustion de l'échangeur. Les récupérateurs les plus fréquemment utilisés sont de type tubulaires ou à

plaques. Plusieurs configurations sont disponibles et ce type de récupérateur peut être installé à la verticale, à l'horizontal ou à angle.

Figure 12
Récupérateurs à plaques



Un autre type utilisé de récupérateur de chaleur à convection est celui où l'échangeur fait partie intégrante du brûleur, avec une flamme directe comme dans le cas d'un four à creuset montré à la figure 13, ou avec un chauffage de type radiant, comme montré à la figure 14. Ce type de récupération peut alors être intéressante même pour des fours de faibles dimensions.

Figure 13
Four à creuset muni d'un brûleur auto-récupérateur

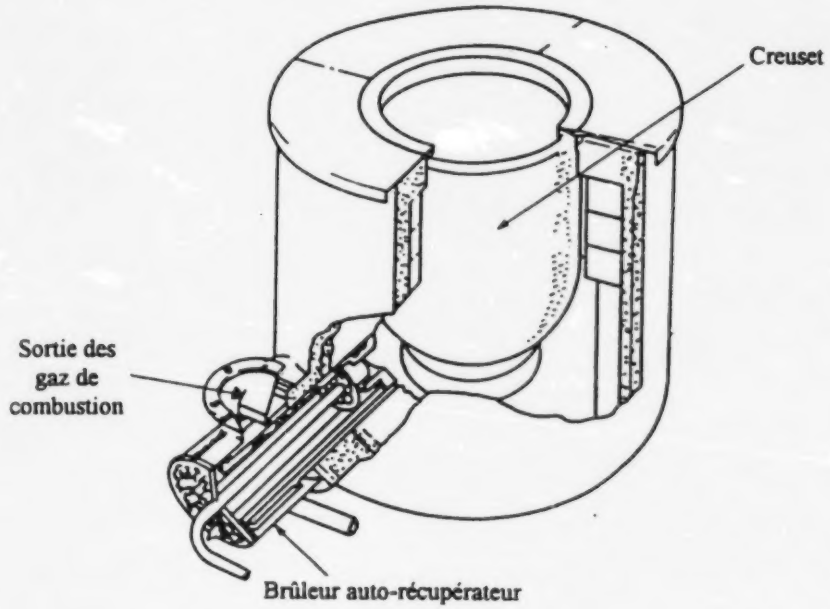
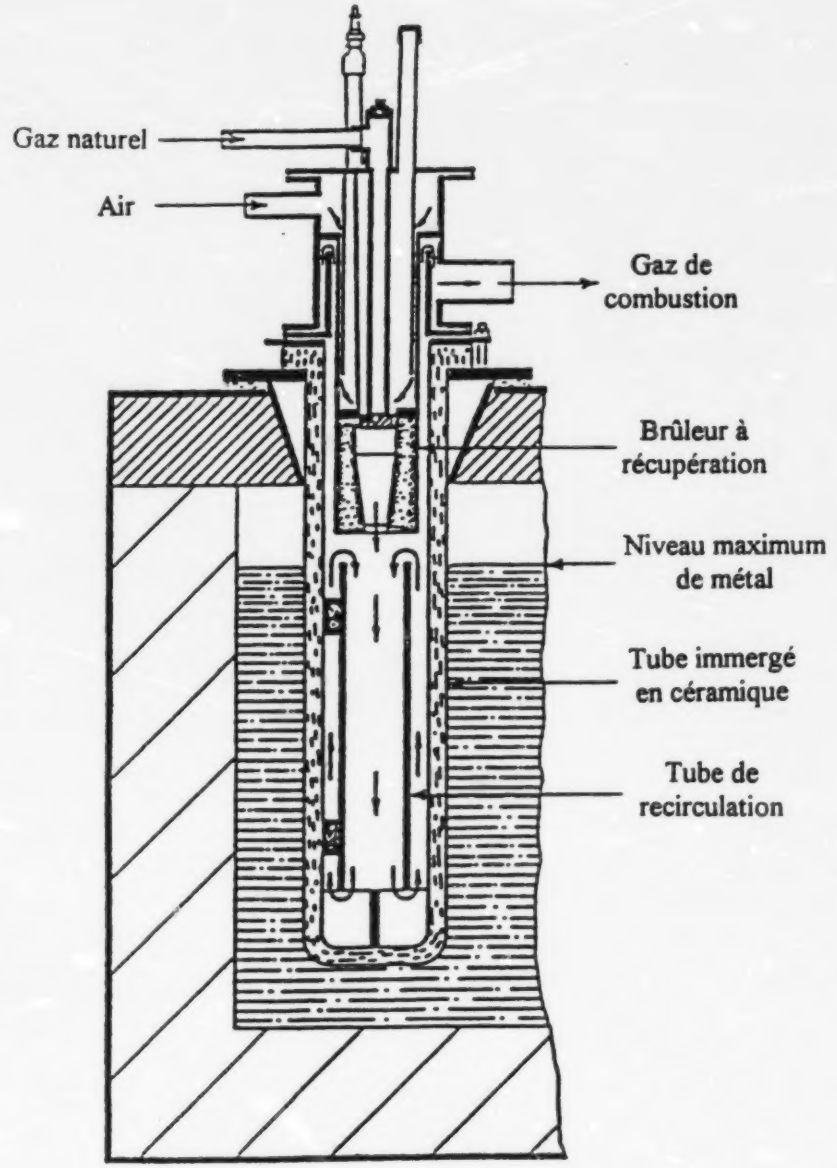


Figure 14
Brûleur au gaz naturel à immersion

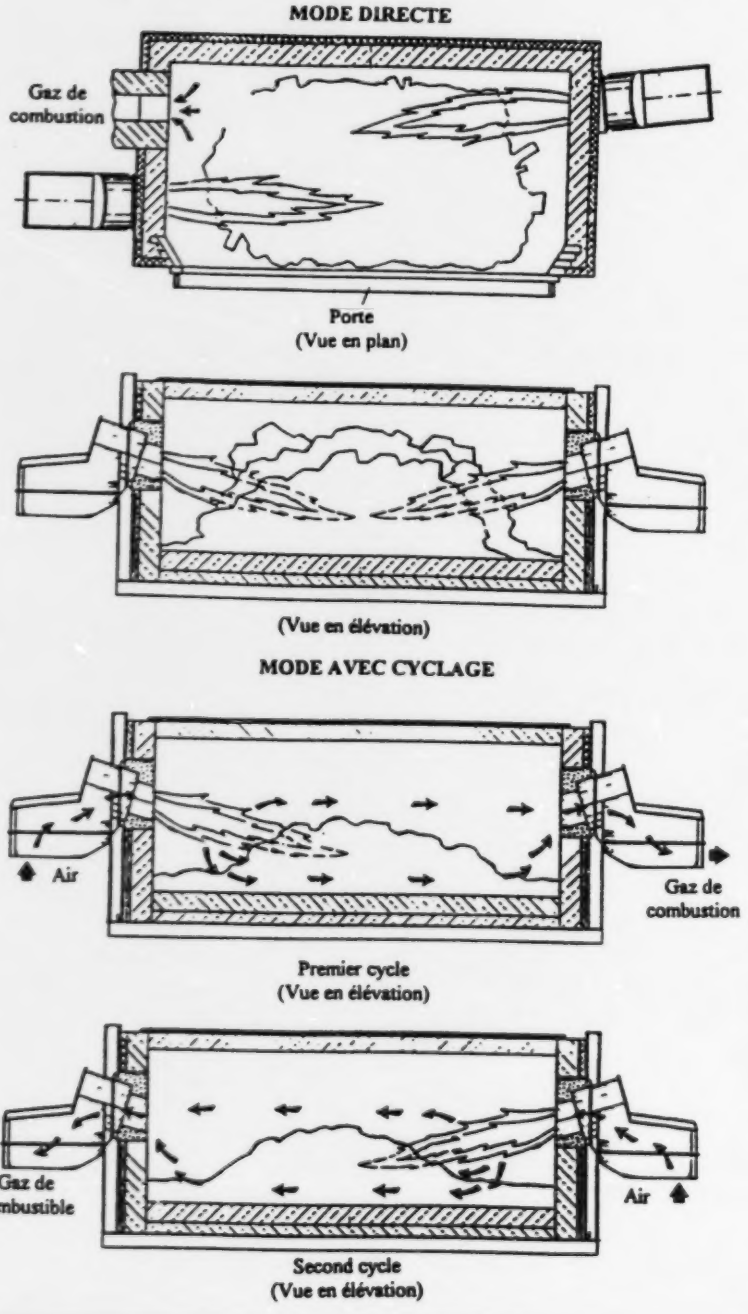


Le principal désavantage du récupérateur à convection est qu'il doit utiliser des gaz de combustion à des températures généralement inférieures à 1 200/1 300 °C. Leur conception peut ne pas être recommandée pour certains environnements sales ou corrosifs. Il faudra veiller à vérifier sa compatibilité avec le chlore, utilisé souvent dans le procédé de la fusion de l'aluminium, à cause des problèmes de corrosion pouvant y être rencontrés.

2.4.2 Les régénérateurs de chaleur

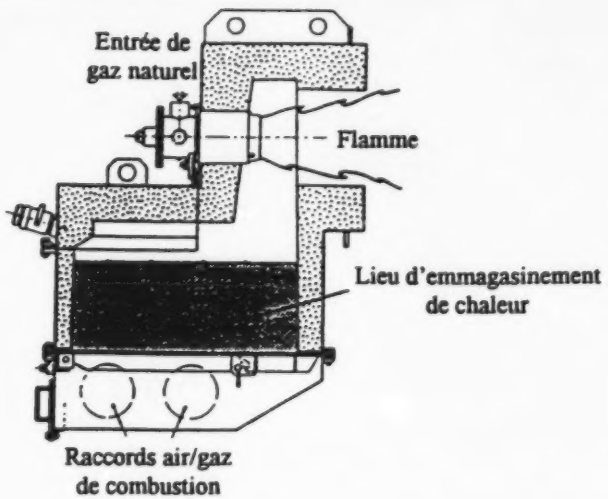
Un régénérateur de chaleur se définit comme un dispositif pour emmagasiner l'énergie. Chaque régénérateur contient un matériel caloporteur où l'énergie des gaz de combustion peut être entreposée lorsqu'ils y circulent. Ce matériel caloporteur consiste en des billes de céramique installées dans des réservoirs avec réfractaire.

Figure 15
Régénération de chaleur



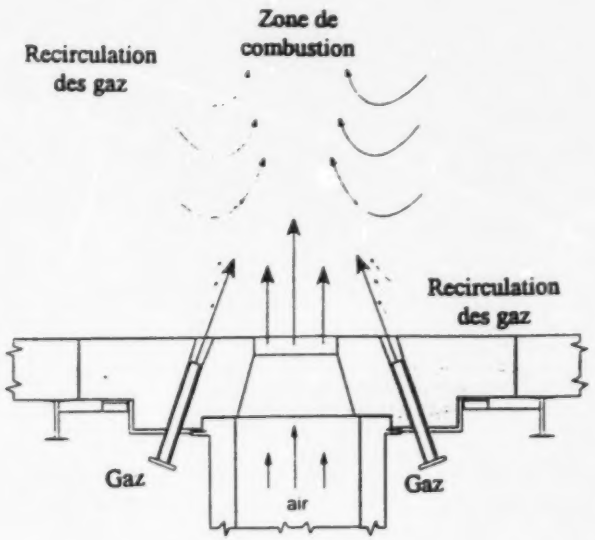
Ce type d'équipement fonctionne sur le principe de l'alternance selon des cycles courts en mode de déchargement et rechargement des réservoirs. Sur le cycle de chargement d'énergie, le brûleur devient la source de chaleur pour son régénérateur. Après une période d'emmagasinement de l'énergie du cycle de régénération, le débit des gaz de combustion est interrompu et l'air froid (air de combustion par exemple) est introduit au travers du médium d'entreposage réchauffé. Cet air froid extrait alors la chaleur de ce médium, et sa température augmente. Lorsque le médium d'entreposage ne possède plus assez de chaleur disponible, le régénérateur doit être « rechargé ». Le débit d'air est alors interrompu en faveur des gaz de combustion jusqu'au prochain cycle de régénération qui dure souvent moins de 30 secondes.

Figure 16
Brûleur avec auto-récupérateur



Afin de maintenir continus les débits d'air et de gaz de combustion, il est nécessaire de fonctionner en cyclant les régénérateurs par paire, l'un étant chargé en énergie par les gaz de combustion alors que la chaleur du second est déchargée par l'air. Des mécanismes de sécurité sont nécessaires afin de s'assurer que la température des gaz de combustion ne baisse pas sous le seuil critique du point de rosée de certaines de ses composantes. Certains types de brûleur utilisent une recirculation des gaz de combustion à l'intérieur du foyer du four, afin de maintenir le niveau des NO_x à un niveau acceptable. Cette recirculation est générée par l'effet de venturi créé par le courant de la flamme et des injecteurs de gaz naturel, dont le jet est également dirigé vers la flamme du brûleur.

Figure 17
Recirculation des gaz de combustion



Les principaux avantages des régénérateurs de chaleur sont la très haute efficacité obtenue (75% à 95%) souvent à haute température, leur capacité d'être utilisés avec une température des gaz de combustion d'environ 1 370 °C, ainsi que leur grande tolérance aux gaz sales ou corrosifs. De plus, comme il n'y a pas de cloisons ou de barrières physiques entre les fluides, le problème d'étanchéité entre les gaz et l'air de combustion est éliminé. Le nettoyage du médium consiste en un rinçage régulier et l'entretien de ce type d'équipement est souvent réalisé sans l'arrêt de production. L'opérateur du four peut choisir, en cas de bris ou lors de l'entretien du système de régénération, de contourner le mode de cyclage avec régénération des brûleurs pour les utiliser en feu direct sans régénération.

Les principaux désavantages des régénérateurs sont leur coût plus élevé que les récupérateurs traditionnels et ce, pour des performances comparables, leur fonctionnement en paire, ainsi que les coûts d'entretien élevés par la complexité de la robinetterie et des contrôles installés. Les problèmes courants à surveiller sont l'encrassement des réservoirs de céramique, la détérioration des matériaux du système d'évacuation et la surchauffe du réfractaire pouvant survenir à certains endroits du four par le retour des gaz de combustion au brûleur.

3.0 AUTRES MESURES APPLICABLES AUX ALUMINERIES

Cette section du guide présente un bref survol de trois (3) autres mesures pouvant être réalisées dans l'industrie de l'aluminium.

3.1 FUSION A L'OXY/FUEL DE L'ALUMINIUM SECONDAIRE

Plusieurs méthodes et combinaisons sont disponibles pour une combustion favorisant l'utilisation de l'oxygène dans les fours industriels, comme celle avec enrichissement à l'oxygène, l'ajout d'injecteur d'oxygène et les brûleurs à l'oxy-fuel. Les améliorations de la productivité globale d'un four et de sa consommation de combustible sont plus largement déterminées par la concentration d'oxygène utilisée que par les méthodes de combustion utilisant l'oxygène. Le principal avantage de l'enrichissement d'oxygène est la simplicité de conversion des brûleurs existants. Il augmentera souvent le taux de production de chaleur du four de l'ordre de 10% à 20%.

L'enrichissement direct d'oxygène dans l'air de combustion est la technique la plus simple pour utiliser l'oxygène avec des brûleurs conçus pour une combustion conventionnelle avec l'air. L'oxygène est souvent injecté par un mécanisme dans le conduit d'amenée d'air de combustion en aval du brûleur. Cet enrichissement augmente de façon marquée la température de la flamme et des précautions doivent souvent être prises, afin de limiter la température du bloc du brûleur et du réfractaire autour de ce dernier, ainsi que sur la distribution des températures dans le four.

Une autre façon utilisée avec les fours réverbères de fusion consiste à ajouter un injecteur installé à angle au travers du mur d'un four près d'un brûleur conventionnel. Cet injecteur est souvent installé sous la flamme du brûleur afin

d'augmenter la température du bas de la flamme et le transfert local de chaleur près de la charge d'aluminium, et minimiser les risques de surchauffe du plafond du four. Les principaux avantages de cet injecteur sont son faible coût d'installation et la flexibilité de modifier les caractéristiques de la flamme produite.

Un brûleur à l'oxy/fuel peut être utilisé comme complément à des brûleurs conventionnels ou pour remplacer un brûleur existant afin d'augmenter l'efficacité d'un four. Il est souvent positionné pour améliorer la distribution des températures dans un four ou lorsqu'on désire utiliser une flamme à de hautes températures directement sur la charge d'aluminium. La majorité des brûleurs à l'oxy/fuel est aujourd'hui à faible émission de NO_x, à recirculation de gaz de combustion et possède un dispositif d'ajustement de flammes.

Un brûleur mixte air-oxy/fuel peut être utilisé avec l'oxy/fuel durant la période initiale de préchauffage du four où on favorise le chauffage de la charge par convection jusqu'à sa température de fusion à cause de la basse température du four, de la faible génération de NO_x et du faible rayonnement du réfractaire du four à cette température. Par la suite, on réutilise l'oxy/fuel à haute température parce qu'il tend à éliminer une grande partie de l'azote dans l'atmosphère du four, en diminuant la génération possible de NO_x et en raison de la meilleure efficacité du four obtenue par la diminution de l'ordre de 20% des gaz de combustion et de ses effets.

3.2 INSTALLATION DE POMPE A ALUMINIUM DANS LES FOURS DE FUSION

L'installation d'une pompe circulatoire dans le bain d'aluminium d'un four réverbère permet de créer un effet de vortex ayant pour but d'améliorer la rapidité de la fonte de l'aluminium, le transfert de chaleur, le rendement énergétique global du four, l'homogénéité de la température du bain et sa stabilité thermique.

L'utilisation d'une pompe permet de diminuer le nombre d'ouvertures des portes du four et ainsi diminuer les déperditions thermiques de ce dernier.

D'autres facteurs seront toutefois à considérer lors de l'installation d'une pompe comme ses frais d'entretien, le coût des pièces de rechange, le coût supplémentaire d'énergie pour le fonctionnement de cette pompe, ainsi que l'impact sur la qualité de la production d'aluminium.

3.3 INSTALLATION DE CONTROLE EN TEMPS REEL POUR LE REFROIDISSEMENT DES LINGOTS D'ALUMINIUM

Le rôle du système de refroidissement secondaire est de contrôler l'état thermique de l'aluminium en fusion lors du coulage dans les moules. Cette technologie a été éprouvée avec succès en Finlande.

Le contrôleur utilisé pour le refroidissement des lingots d'aluminium est basé sur un modèle de transfert de chaleur en temps réel. Il calcule la distribution de la température actuelle de la billet selon la vitesse de coulée, la répartition de la température, le taux d'écoulement d'eau secondaire et de surchauffe. Le taux d'écoulement d'eau de chaque zone de refroidissement est alors calculé par rapport à la différence entre la température cible et la température actuelle.

Le contrôle de ce refroidissement permet d'augmenter la production en diminuant les pertes de métal. L'économie d'énergie indirecte découlant de cette mesure est la quantité d'énergie sauvée pour la refonte des rebuts d'aluminium.

4.0 CONCLUSION

Ce guide sur l'efficacité énergétique dans l'industrie de l'aluminium avait pour but de présenter certaines mesures d'économie d'énergie pouvant être implantées dans les alumineries, ainsi que les mécanismes d'analyse et de mise en œuvre de ces mesures.

La recherche de mesures d'économie d'énergie exige une vision de l'ensemble des composantes du procédé de fabrication et des équipements utilisés. La liste de ces mesures comprend des actions pouvant toucher au procédé de fabrication de l'aluminium, comme la combustion d'un four de fusion ou d'autres mesures traditionnellement implantées dans le secteur industriel, tel le remplacement de registres par l'installation d'un entraînement à vitesse variable sur un moteur. Ces mesures plus conventionnelles peuvent avoir une rentabilité intéressante et leur étude ne doit pas être négligée. Par ailleurs, l'analyse de l'impact de ces mesures sur le procédé de fabrication doit être réalisée avec un très grand soin.

La recherche d'actions demande une bonne connaissance de la notion de rentabilité et de la tarification de l'énergie. Les mesures sont généralement classées selon l'ordre croissant de leur rentabilité et ont souvent un effet sur le rendement de la production de l'usine. L'élaboration du bilan énergétique d'un procédé ou de l'usine est un excellent outil permettant de déterminer le potentiel d'économie réalisable dans une usine. Finalement, la mise en œuvre d'un bon suivi de la consommation énergétique aide à obtenir le rendement optimal des équipements.

Le choix éclairé des mesures d'économie d'énergie représente un pas important dans l'atteinte de l'objectif de consommation énergétique fixé par l'usine, et leur implantation peut aussi déborder du cadre de l'efficacité énergétique, en permettant à l'usine de devenir ou demeurer concurrentielle sur les marchés mondiaux.

BIBLIOGRAPHIE

The Aluminium Association. *Aluminium Industry Energy Conservation Workshop X Papers.* Octobre 1987

American Gas Association. *Natural Gas Applications for Industry : Volume II : Aluminium Industry.* Septembre 1988

American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. *ASHRAE Handbook Fundamentals.* 1997.

British Gas School of Fuel Management. *Combustion Engineering and Gas Utilisation, 3ème édition.* 1992.

CADDET Analyses Series No. 1. *Learning from experiences with Process Heating in the Metals Industry.* 1993.

Eclipse Combustion Division. *Recuperation and Regeneration Systems.* Sans date.

European Aluminium Association. *Ecological Profile Report for the European Aluminium Industry* Février 1996.

European Aluminium Association. *Environmental Issues in the Aluminium Industry.* Février 1996.

Gaz Métropolitain, Informatech Volume 4, No. 3. *La recherche des économies d 'énergie pour les fours industriels.* Juillet 1989.

Hydro-Québec. *Les moteurs à haut rendement.* 1992

Hydro-Québec, Programme d'initiatives et d'analyses énergétiques. *Systèmes de pompage, de ventilation et de compression (SPVC).* 1994

North American Mfg. Co. *Combustion Handbook Volumes I et II, 3ème édition.* Mars 1997.

U.S. Department of Energy in cooperation with The Aluminium Association, Office of Industrial Technologies. *Report of the Aluminium Technology Roadmap Workshop.* Février 1997.

U.S. Department of Energy. *Energy and Environmental, Profile of the U.S. Aluminium Industry.* Sans date.

COORDONNÉES DES AUTEURS ET DES PRINCIPALES ORGANISATIONS CITÉES

LES PRINCIPAUX COLLABORATEURS AU PROJET :

Association l'Aluminium du Canada

Monsieur Christian L. Van Houtte
1010, rue Sherbrooke Ouest
Bureau 1600
Montréal (Québec) Canada
H3A 2R7
Téléphone (514) 288-4842
Télécopieur (514) 288-0944

Ressources Naturelles Canada
Office de l'efficacité énergétique

Monsieur Vaughn G. Munroe, ing.
Agent, Industrie
Division des programmes
des secteurs industriel, commercial et institutionnel
580, rue Booth, 18e Étage
Ottawa (Ontario) Canada K1A 0E4
Téléphone (613) 947-1594
Télécopieur (613) 947-4121

Soprin ADS

Monsieur Pierre Langlois, ing.
1220, boul. Lebourgneuf
Bureau 1200
Québec (Québec)
Canada G2K 2G4
Téléphone (418) 626-1688
Télécopieur (418) 626-5464